N° d'enregistrement au
C.N.R.S. : A.O.7181

UNIVERSITE DE PROVENCE
(Aix-Marseille I)
U.E.R. DE PHYSIQUE

THESE

présentée pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Claude GUINTRAND

UTILISATION DES SYSTEMES AUTO-ADAPTATIFS OPTIMALISANTS POUR LA COMMANDE DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX IRRADIES DANS UN REACTEUR NUCLEAIRE. APPLICATION A LA COMMANDE DES HUIT BOUCLES D'ESSAIS DE COMBUSTIBLE DU REACTEUR PEGASE

Soutenue le 6 Mai 1972 devant la Commission d'Examen

JURY

MM.	L. SIDERIADES	Président
	J. BERBEZIER	
	M. CADILHAC	
	G. FRIEDLING	Examinateurs
	J. HENNEQUIN	
	H. OTTAVI	

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547004_0018

N° d'enregistrement au
C.N.R.S. : A.O.7181

UNIVERSITE DE PROVENCE
(Aix-Marseille I)
U.E.R. DE PHYSIQUE

THESE

présentée pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Claude GUINTRAND

UTILISATION DES SYSTEMES AUTO-ADAPTATIFS OPTIMALISANTS POUR LA COMMANDE DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX IRRADIES DANS UN REACTEUR NUCLEAIRE. APPLICATION A LA COMMANDE DES HUIT BOUCLES D'ESSAIS DE COMBUSTIBLE DU REACTEUR PEGASE

Soutenue le 6 Mai 1972 devant la Commission d'Examen

JURY

MM.	L. SIDERIADES	Président
	J. BERBEZIER	
	M. CADILHAC	
	G. FRIEDLING	Examinateurs
	J. HENNEQUIN	
	H. OTTAVI	

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

U.E.R. SCIENTIFIQUE

Président : F. BOREL

Secrétaire Général : C. MOYNAULT

PROFESSEURS

MM.	J. VALENSI	Mécanique expérimentale des fluides
	P. ROUARD	Physique générale
	P. DESNUELLE	Chimie biologique
	M. ABELOOS	Biologie générale
	M. MERIGOUX	Physique industrielle
	C. FEHRENBACH	Astronomie
	A. FAVRE	Mécanique de l'atmosphère et météorologie
	A. GUILLEMONAT	Chimie industrielle
	G. CARPENI	Chimie
	Y. DOUCET	Physique
	J.M. SOURIAU	Méthodes mathématiques de la physique
	J. METZGER	Chimie
	L. FOURES	Mathématiques
	D. MALE	Physique
	G. BODIOU	Mathématiques appliquées
	M. NAUDET	Chimie des corps gras
	P. BOUSQUET	Physique
	P. PESTEIL	Physique
	P. CASAL	Mécanique rationnelle et appliquée
	G. GOUVERNET	Géologie appliquée
	A. VISCONTI	Physique théorique
	A. BLANCHARD	Mathématiques générales
	M. DUSSARDIER	Physiologie animale

MM.	M. PERROT	Physique
	P. QUEZEL	Botanique
	E. CRAUSSE	Physique (Avignon)
	A. JULG	Chimie théorique
	S. TAXY (Mme)	Géologie historique
	F. TESSIER	Géologie générale
	M.L. FURNESTIN (Mme)	Biologie animale
	M. BERTRAND	Chimie
	J. TROMPETTE	Physique
	M. LAFFITTE	Chimie
	R. FRAISSE	Mathématiques
	C. BLANCHARD (Mme)	Mathématiques
	R. NEGRE	Biologie végétale
	R. COULON	Physique
	R. KERN	Minéralogie
	L. SIDERIADES	Physique
	J.M. SURZUR	Chimie organique
	H. CHANTREL	Physique de l'espace
	J. SOUGY	Géologie
	J. HERVE	Electronique
	H. BODOT	Chimie
	J. CHOUTEAU	Physiologie animale
	R. PHILIP	Physique
	L. CAPELLA	Minéralogie
	P. BILLARD	Mathématiques
	M. BONNEAU	Mathématiques
	J.C. TRAYNARD	Chimie industrielle
	C. CLARION (Melle)	Mécanique des fluides
	A. PONS	Biologie végétale
	J.C. MAIRE	Chimie
	M. SIMON	Physiologie végétale
	J. MANDELBROUT	Physique
	J.P. DAVID	Physique
	M. BIZOUARD	Physique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	R. AMAR	Zoologie
	L. DEVEZE	Biologie marine
	F. BOREL	Techniques mathématiques de la physique
	R. CHANDEBOIS (Melle)	Biologie animale
	H. GUENOCHE	Mathématiques appliquées
	F. PECAUT (Mme)	Mathématiques (Avignon)
	J. HENNEQUIN	Electronique
	S. GUEIRARD (Melle)	Pétrographie
	C. FEUGEAS	Chimie
	J. CABANE	Chimie
	G. RASIGNI	Physique
	S. COMBET	Chimie
	R. GARRON	Physique expérimentale
	M. CADILHAC	Physique
	B. WAEGELL	Chimie
	L. LAGARDE (Melle)	Chimie minérale
	G. MARCHIS-MOUREN	Chimie biologique
	F. HALBWACHS	Physique (Avignon)
	R. PETIT	Physique
	M. HUGON	Psycho-physiologie

MAITRES DE CONFERENCES

MM.	H. PATIN	Chimie
	M. PICHENOT (Melle)	Biologie végétale
	M. GILLET	Physique
	J.P. ROGGERO	Chimie (Avignon)
	J. CRESP	Biologie animale
	L. SARDA	Biochimie
	M. BENARROCHE	Physique
	H. TACHOIRE	Chimie

MM.	C. ROMAN	Physiologie animale
	A. GILLET	Mathématiques
	E. VINCENT	Chimie
	L. VINCENTE	Biologie animale
	S. MARTINUZZI	Physique
	J. MANUCEAU	Mathématiques
	R. GUERMEUR	Physique
	M. DELAAGE	Biochimie
	F. CATZIGRAS (Melle)	Géologie
	M. SIRUGUE (Mme)	Physique
	H. MERDY	Physique
	L. PUJOL	Chimie
	A. LAVAGNE	Biologie végétale
	J. GIUDICELLI	Biologie animale
	M. FOUGEREAU	Biochimie
	G. NOAT	Physiologie végétale
	R. BOUDET	Mathématiques
	G. FARDOUX	Chargé d'enseignement - Mathématiques
	B. MORIN	Chargé d'enseignement - Mathématiques
	B. BALLET	Chargé d'enseignement - Mathématiques(Avignon
	R. STREIFF	Chimie
	J.P. BELAICH	Microbiologie
	P. NEVILLE	Biologie végétale

Ce travail a été effectué à la Section d'Electronique et d'Instrumentation (SEIn) du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, grâce à une bourse d'études allouée par le Commissariat à l'Energie Atomique.

Je prie M. J. HENNEQUIN, mon directeur de recherche, et M. L. SIDERIADES, qui a bien voulu présider mon jury, de trouver ici l'assurance de ma profonde gratitude. Leur enseignement, leur aide et leurs conseils m'ont toujours été d'un grand secours, même en dehors du cadre de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à M. J. BERBEZIER, chargé des Programmes au CEN de Cadarache, et à M. G. FRIEDLING, Chef de la SEIn, qui m'ont confié cette étude et n'ont cessé de me prodiguer leurs encouragements et de me témoigner leur confiance.

Je remercie vivement M. le Professeur M. CADILHAC qui a bien voulu accepter de faire partie de mon jury et M. H. OTTAVI, chargé de Recherches au CNRS, qui a eu l'amabilité de m'offrir son concours et d'être mon examinateur.

Mes remerciements vont également à tous les agents du Service de la Pile Pégase, et en particulier à MM. LURIE et GOUIRAND, pour leur cordiale et précieuse coopération.

Il serait trop long de citer ici tous ceux qui, de diverses manières, ont favorisé la réalisation de ce travail, et en particulier les membres ;

- du Centre de Calcul Analogique et Hybride,
- du Centre de Calcul Numérique,
- des Services de Documentation et de Photographie.

Je les remercie pour l'aide qu'ils m'ont fournie pour leur gentillesse et, souvent, leur patience.

Il est, sans doute, superflu de dire enfin combien je suis reconnaissant envers tous les agents de la SEIn, qui m'ont intégré à leur équipe et m'ont toujours apporté leur secours tant technique, par leurs conseils, que moral, par leur amitié.

S O M M A I R E

	Pages
1. - AVANT PROPOS	1
2. - LE REACTEUR PEGASE	3
2.1. Généralités	3
2.2. Etude du fonctionnement d'une boucle d'irradiation	6
2.3. Expériences réalisées et problème posé	14
3. - UNITE DE REGULATION	17
3.1. Introduction	17
3.2. Etude théorique	18
3.3. Réalisation et résultats obtenus	59
4. - CONCEPTION GENERALE DE L'UNITE DE COMMANDE CENTRALISEE	66
5. - ETUDE THEORIQUE DE L'UNITE DE COMMANDE	70
5.1. Commande optimale des cyclages	71
5.2. Régulation	90
5.3. Estimation des paramètres	112
6. - PROJET DE REALISATION	123
6.1. Structure de l'unité de commande	123
6.2. Le calculateur et l'ensemble électronique	126
6.3. Le programme	127
7. - CONCLUSION	132

1 - AVANT-PROPOS

Depuis la parution des travaux de PONTRYAGIN, pour l'école soviétique, et de BELLMAN, pour l'école américaine, en particulier, l'étude de méthodes de synthèse de systèmes à commande optimale s'est considérablement développée. Une littérature abondante en témoigne. Leur utilisation pratique est, cependant, restée le plus souvent réservée à la résolution de problèmes soit d'ordre économique, c'est-à-dire mettant en jeu un revenu ou une consommation, soit de poursuite, où il s'agit de minimaliser un temps.

Le contrôle des systèmes expérimentaux, en physique nucléaire n'appartient à aucune de ces deux catégories. Leur étude pose pourtant bien un problème d'optimalisation. On demande toujours à de tels systèmes de fournir une précision maximale. D'un autre côté, la nature particulière des expériences réalisées amène à accorder une importance capitale à la sécurité de fonctionnement de l'installation. Là où l'emploi des méthodes classiques de synthèse permet d'obtenir un compromis entre ces deux exigences le plus souvent incompatibles, l'élaboration d'une loi de commande optimale procurerait le meilleur compromis possible, sous réserve que l'on puisse définir de façon précise ce que l'on entend par là.

L'expérimentation des éléments combustibles nucléaires est un exemple caractéristique de ce type de problèmes. Des réacteurs de recherche ont été spécialement étudiés pour essayer ces éléments dans leurs conditions de fonctionnement réel et en vraie grandeur, tel le réacteur Pégase construit au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache. La Section d'Electronique et d'Instrumentation a entrepris d'étudier la possibilité de commander la partie expérimentation de ce réacteur de façon optimale et automatique.

Ce travail a abouti, dans une première étape, à la réalisation de tiroirs de régulation autonomes. La deuxième étape a consisté à étudier une commande optimale et auto-adaptative des expériences, à l'aide d'une unité de contrôle centralisée comportant un calculateur "temps réel" en ligne.

2 - LE REACTEUR PEGASE

2.1. - GENERALITES

2.1.1. Description générale

Le réacteur Pégase a été spécialement étudié et construit pour l'expérimentation d'éléments combustibles nucléaires. Cette expérimentation est d'une importance très grande étant donné que le bon fonctionnement et la sécurité d'une centrale nucléaire dépendent en grande partie du comportement des éléments qui en constituent le coeur. L'intérêt particulier de ce réacteur est de permettre de faire travailler ces derniers dans leurs conditions de fonctionnement réel et en vraie grandeur. En effet, d'une part les expériences réalisées sur un réacteur prototype d'échelle réduite risquaient de ne pas mettre en évidence certains phénomènes, d'autre part il est impossible de les effectuer sur la centrale à laquelle sont destinés ces éléments pour des raisons bien compréhensibles de sécurité.

La zone centrale du réacteur Pégase est composée de deux parties bien distinctes : la source de neutrons et la zone d'expérimentation. On a cherché à diminuer le plus possible les interactions entre ces deux parties, ce qui donne à l'ensemble une grande souplesse d'utilisation.

La source de neutrons est constituée par un coeur en uranium enrichi, modéré et refroidi par de l'eau. Ce coeur fonctionne, en régime normal, à une puissance fixe de 28 mégawatts. La partie destinée à l'expérimentation se compose de huit ensembles autonomes, ou "boucles d'irradiation", disposés tout autour du coeur.

2.1.2. Les boucles d'irradiation

Ces ensembles contiennent les éléments combustibles à essayer et sont mobiles par rapport au coeur. Il est ainsi possible d'amener une boucle en position d'irradiation ou de l'enlever sans perturber le fonctionnement du coeur et des autres boucles. Chaque boucle simule, en vraie grandeur, les conditions dans lesquelles l'élément qu'elle contient sera utilisé. Celles-ci ont essentiellement trait à la nature, à la pression et au débit du fluide de refroidissement. Par conséquent, à chaque type de centrale nucléaire correspond un type de boucle d'irradiation.

La figure 2-1 donne le schéma général d'une boucle EDF. Les autres types de boucles ne diffèrent de celle-ci que par des points de détail et par leurs conditions de fonctionnement.

L'élément combustible (6) à essayer est placé dans le canal d'essai (5) celui-ci étant aussi transparent que possible aux neutrons.

Il se présente, dans la majorité des cas, sous la forme de barreaux d'uranium naturel, gainés avec un alliage de magnésium-zirconium. En général, on réalise l'empilement suivant : ½ élément, 1 élément entier dont le plan médiateur est, en position d'irradiation, confondu avec celui du coeur, ½ élément. L'ensemble a une longueur maximale de 120 cm. D'autre part, l'élément est entouré d'une chemise, le plus souvent en graphite, qui sert de réflecteur.

Le fluide de refroidissement utilisé actuellement est l'anhydride carbonique sec. En parcourant la boucle dans le sens normal de circulation du gaz (sens ascendant dans le canal d'essai) et en partant du chargement, on rencontre successivement :

- un filtre (4);
- une vanne à trois voies (10) et un échangeur fluide de refroidissement-eau de la piscine d'irradiation (7), la vanne permettant de court-circuiter partiellement ou totalement l'échangeur;
- une soufflante (11);
- le panier contenant le chargement à irradier (6).

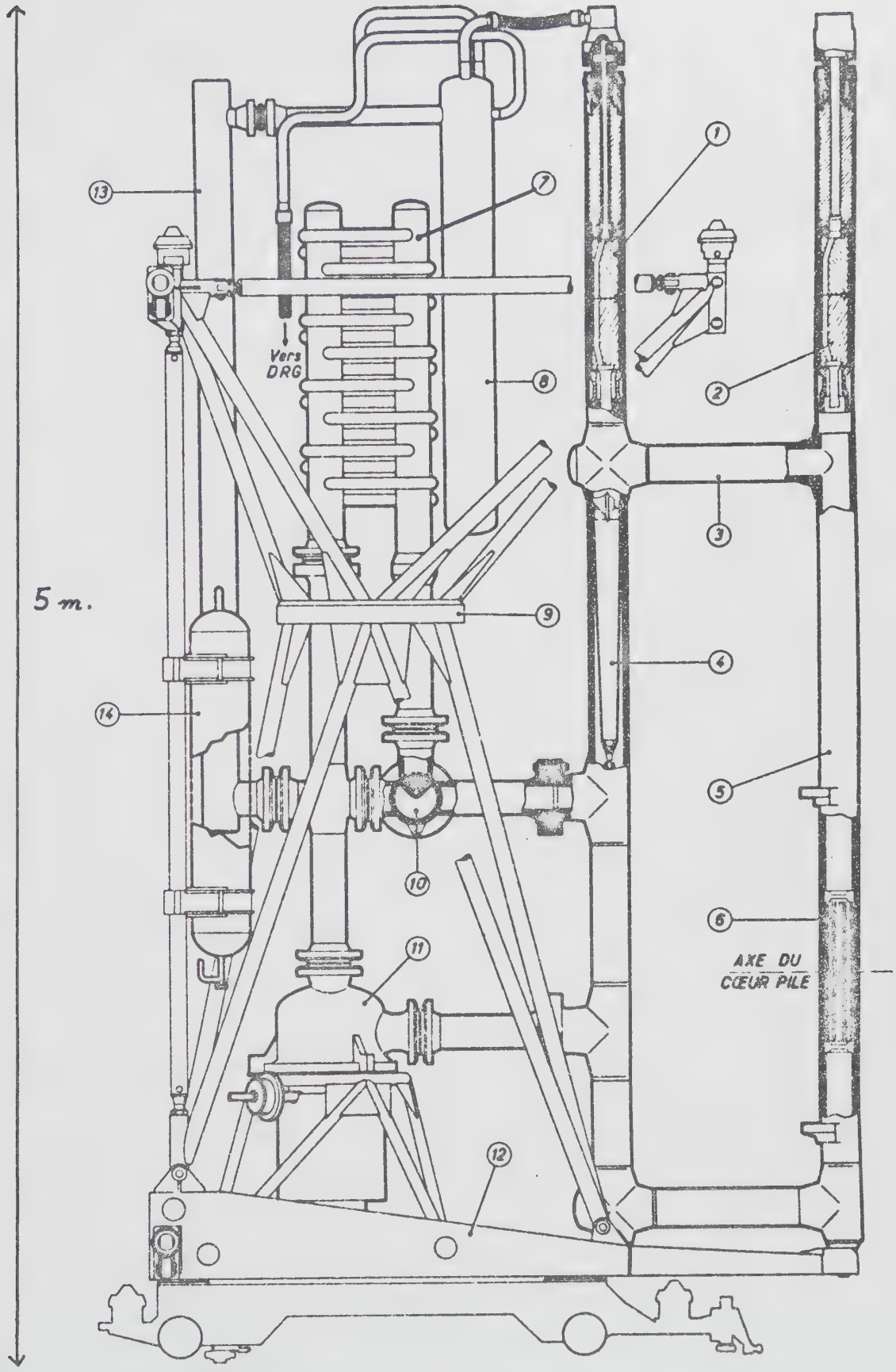


Fig. 2-i- BOUCLE EDF. SCHEMA GENERAL

Le canal d'essai se termine par un orifice qui permet l'introduction de la charge de combustible. Celle-ci est placée dans un panier en acier inoxydable suspendu au bouchon (2) qui obstrue le canal d'essai. Ce bouchon comporte à son extrémité un connecteur à 36 broches qui peut recevoir 18 thermocouples donnant les températures des gaines, de l'uranium et du gaz.

Le bouchon arrière (1) qui supporte le filtre est percé pour permettre un prélèvement de gaz. Celui-ci est envoyé vers l'unité de DRG (Détection de Rupture de Gaine) correspondant à la boucle. Le gaz analysé est recyclé à la sortie du vase d'expansion.

L'ensemble de la boucle, qui mesure environ 5 m de hauteur, repose sur un chariot (12) qui peut être déplacé sur des rails disposés sur le fond de la piscine d'irradiation.

Les boucles de type EL4* et INCA* sont sensiblement identiques aux boucles EDF. Par contre, dans le cas des boucles HTR*, on peut noter la présence d'un circuit secondaire de refroidissement prélevant le gaz tout de suite après son passage à travers l'élément combustible et le réinjectant immédiatement avant. Ce circuit possède un compresseur et une vanne réglant le débit de gaz. De plus, il est prévu d'équiper la boucle de charges doubles ou triples, chaque élément possédant alors son propre circuit et sa propre vanne. Ces vannes sont dites vannes "Corblin".

2.2. - ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UNE BOUCLE

Cette étude a été faite sur une boucle type EDF 3 équipée d'une charge GC3. En toute rigueur, les résultats obtenus ne sont donc valables que dans ce cas particulier. Cependant, on peut raisonnablement penser que la forme des équations reste la même quel que soit le type de boucle utilisé. C'est pourquoi nous nous sommes principalement attachés à déterminer les lois générales régissant le fonctionnement d'une boucle, beaucoup plus que les valeurs des divers paramètres. D'autre part, bien que des considérations d'ordre théorique aient servi de point de départ à cette étude, nous nous sommes

* EL4 : réacteur à Eau Lourde
INCA : réacteur à refroidissement INCorporé Annulaire
HTR : Réacteur à Haute Température

surtout basés sur des résultats expérimentaux qui tiennent mieux compte des diverses non-linéarités présentes.

On pourra estimer que le système d'unités employé est assez hétérogène. La raison en est que nous avons préféré conserver les unités utilisées pratiquement. C'est ainsi, par exemple, qu'une puissance thermique sera exprimée, dans la même équation, en kilowatts selon qu'il s'agit de la puissance débitée dans un barreau ou de celle du réacteur.

2.2.1. Puissance thermique dans le barreau

La boucle, équipée du barreau d'uranium à essayer, est placée dans la piscine, en face du coeur de la pile. La puissance W débitée dans le barreau dépend de :

- la puissance P de la pile;
- le niveau du flux neutronique à hauteur du barreau;
- la masse et la géométrie du barreau d'uranium.

Le niveau moyen du flux neutronique est proportionnel à la puissance pile, mais le niveau du flux à hauteur de la boucle considérée dépend fortement, en outre, de la position des barres de contrôle. Si, par exemple, on effectue un basculement symétrique des barres Nord et Sud, le niveau de flux moyen ne change pas, mais le niveau de flux local varie de façon notable. D'autre part, la présence d'une autre boucle près du coeur peut apporter des perturbations supplémentaires.

Enfin, le niveau de flux dans le plan médian du barreau dépend de la distance séparant celui-ci de la surface du coeur. En définissant :

$$\varphi = \frac{\text{flux dans le plan médian du barreau}}{\text{flux à la surface du coeur}}$$

on trouve :

$$\varphi = e^{-0,0165\ x}$$

Soit W_b la puissance spécifique dans le barreau .
x étant la distance barreau-coeur exprimée en mm. On a donc :

$$W_b = k_1 \varphi P \qquad (2\text{-}1)$$

La puissance totale W dans le barreau dépend, outre W_b, de la masse de la charge et de sa nature. On est donc amené à introduire un second coefficient k_2 tel que :

$$W = k_2 M W_b \qquad (2\text{-}2)$$

M étant la masse d'uranium exprimée en grammes.

On a donc :

$$W = k_1 k_2 M \varphi P$$

W étant exprimé en kilowatts et P en mégawatts.

2.2.2. Débit massique du fluide de refroidissement

Dans le cas présent, le fluide est du CO_2. Son débit massique q est actuellement mesuré grâce à une tuyère placée à la sortie de la soufflante. On relève la différence de pression ΔP aux bornes de cette tuyère et la température θ_t du CO_2 qu'elle contient. On a alors :

$$q = k_t \sqrt{\rho \Delta P} \qquad (2\text{-}4)$$

avec q en kg/s, ΔP en g/cm^3 et la masse volumique ρ - fonction de θ_t - en g/cm^3 ; k_t est un coefficient déterminé par étalonnage pour une tuyère donnée.

2.2.3. Chaleur spécifique du CO_2

Nous avons pris, pour le calcul de la chaleur spécifique à pression constante C_p dans le canal d'essai, la formule suivante :

$$C_p = 0{,}957 + 0{,}043\ \theta_{1\,m} \cdot 10^{-2} \qquad (2\text{-}5)$$

avec C_p en J/ g x °C et $\theta_{1\,m}$, température moyenne du CO_2 dans le canal d'essai, en °C.

2.2.4. Bilan thermique du barreau

L'élément combustible étant repéré, par rapport au coeur, par sa trace sur un plan de section droite, peut être représenté par une source ponctuelle de capacité calorifique μ_u fournissant une énergie W dont une partie sert à échauffer la source elle-même et dont l'autre se transmet au gaz. L'étude théorique et des essais sur prototype jusqu'à des débits très faibles ont conduit à une équation de la forme :

$$W - \mu_u \frac{d\,\theta_u}{dt} = m_1\ q^{\alpha}\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) \qquad (2\text{-}6)$$

où :

θ_u est la température maximale de la gaine,

m_1 le coefficient d'échange gaine-gaz,

et α un coefficient déterminé expérimentalement.

En régime statique, l'équation (2-6) devient :

$$W = m_1\ q^{\alpha}\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) \qquad (2\text{-}7)$$

ou, en combinant avec (2-3)

$$\frac{\varphi}{C_p\ (\theta_u - \theta_{1m})} = \frac{m_1\ q^{\alpha}}{k_1\ k_2\ M\ P} \qquad (2\text{-}8)$$

Nous avons trouvé, à partir des procès-verbaux d'essais :

$$\frac{\varphi}{C_p\ (\theta_u - \theta_{1m})} = k_3\ q + k_4 \qquad (2\text{-}9)$$

qui est une linéarisation de la courbe donnée par (2-7).

2.2.5. Bilan thermique du canal d'essai

La puissance transférée du barreau au gaz sert à accroître l'enthalpie du CO_2 et à échauffer les parois. Celles-ci, bien que calorifugées, transmettent une partie de la chaleur reçue à l'eau de la piscine. Ces pertes sont estimées à 10 % de la puissance totale. On a donc :

$$m_1\ q^{\alpha} C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) = 1{,}1\ q\ C_p\ (\theta_{sm} - \theta_{em}) + \mu_1 \frac{d\,\theta_{1m}}{dt} \qquad (2\text{-}10)$$

où : θ_{sm} est la température de sortie du CO_2 dans le canal d'essai,

θ_{em} la température d'entrée,

μ_1 la capacité calorifique des parois du canal d'essai.

Nous avons vu plus haut que θ_{1m} est la température moyenne du CO_2 dans le canal d'essai. Soit :

$$\theta_{1m} = \frac{1}{2} (\theta_{em} + \theta_{sm}) \qquad (2\text{-}11)$$

En régime statique, la combinaison de (2-7) et (2-10) donne :

$$W = 1,1\ q\ C_p\ (\theta_{sm} - \theta_{em}) \qquad (2\text{-}12)$$

ou :

$$W = 1,1\ q\ C_p\ \Delta\theta \qquad (2\text{-}13)$$

On trouve expérimentalement :

$$\frac{\varphi}{C_p\ \Delta\theta} = k_5\ q \qquad (2\text{-}14)$$

En éliminant φ entre (2-9) et (2-14), on obtient :

$$(k_3\ q + k_4)\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) = k_5\ q\ C_p\ \Delta\theta \qquad (2\text{-}15)$$

ou :

$$(k_6\ q + k_7)\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) = 1,1\ q\ C_p\ \Delta\theta = W \qquad (2\text{-}16)$$

avec :

$$k_6 = 1,1\ \frac{k_3}{k_5}$$

$$k_7 = 1,1\ \frac{k_4}{k_5}$$

2.2.6. Partie arrière de la boucle

Du point de vue thermique, l'élément principal de la partie arrière est l'échangeur de chaleur. Cet échangeur peut être court-circuité grâce à une vanne à trois voies. On caractérise l'ouverture de la vanne par la variable β, telle que :

$\beta = 0$ quand la vanne est fermée, c'est-à-dire que le CO_2 ne passe pas dans l'échangeur.

$\beta = 1$ quand la vanne est ouverte, c'est-à-dire que tout le gaz passe dans l'échangeur.

Les équations théoriques donnent une expression de la forme :

$$q\ C_p\ \Delta\theta = k_{(q)}\ A_{(\beta)}\ q\ C_p\ (\theta_{sm} - \theta_o) + A_{(\beta)}\mu_4\ \frac{d\ \theta_{1\,m}}{dt} \qquad (2\text{-}17)$$

où :

μ_4 est la capacité calorifique des parois de la partie arrière de la boucle,

θ_o est la température de l'eau de la piscine,

$A_{(\beta)}$ est une fonction de l'ouverture de la vanne définie théoriquement comme le rapport du débit de CO_2 passant dans l'échangeur au débit total. On verra ci-dessous que, de par sa détermination même, elle peut être considérée comme "l'efficacité" de la vanne.

On obtient expérimentalement :

$$k_{(q)} = \frac{\Delta\theta}{\theta_{sm} - \theta_o} = A_{(\beta)}\ \left(1 - \frac{q}{q_o}\right) \qquad (2\text{-}18)$$

q_o étant un coefficient constant ayant les dimensions d'un débit.

On peut alors tracer :

$$\frac{\Delta\theta}{(\theta_{sm} - \theta_o)\ \left(1 - \frac{q}{q_o}\right)} = A_{(\beta)}$$

On obtient, pour $A_{(\beta)}$, une courbe qui peut être approximée par :

$$A = 0{,}16\left[\ 1 - \cos\ (\pi\ \beta)\right] + 0{,}14 \qquad (2\text{-}19)$$

La figure 2-2 donne l'allure de cette courbe.

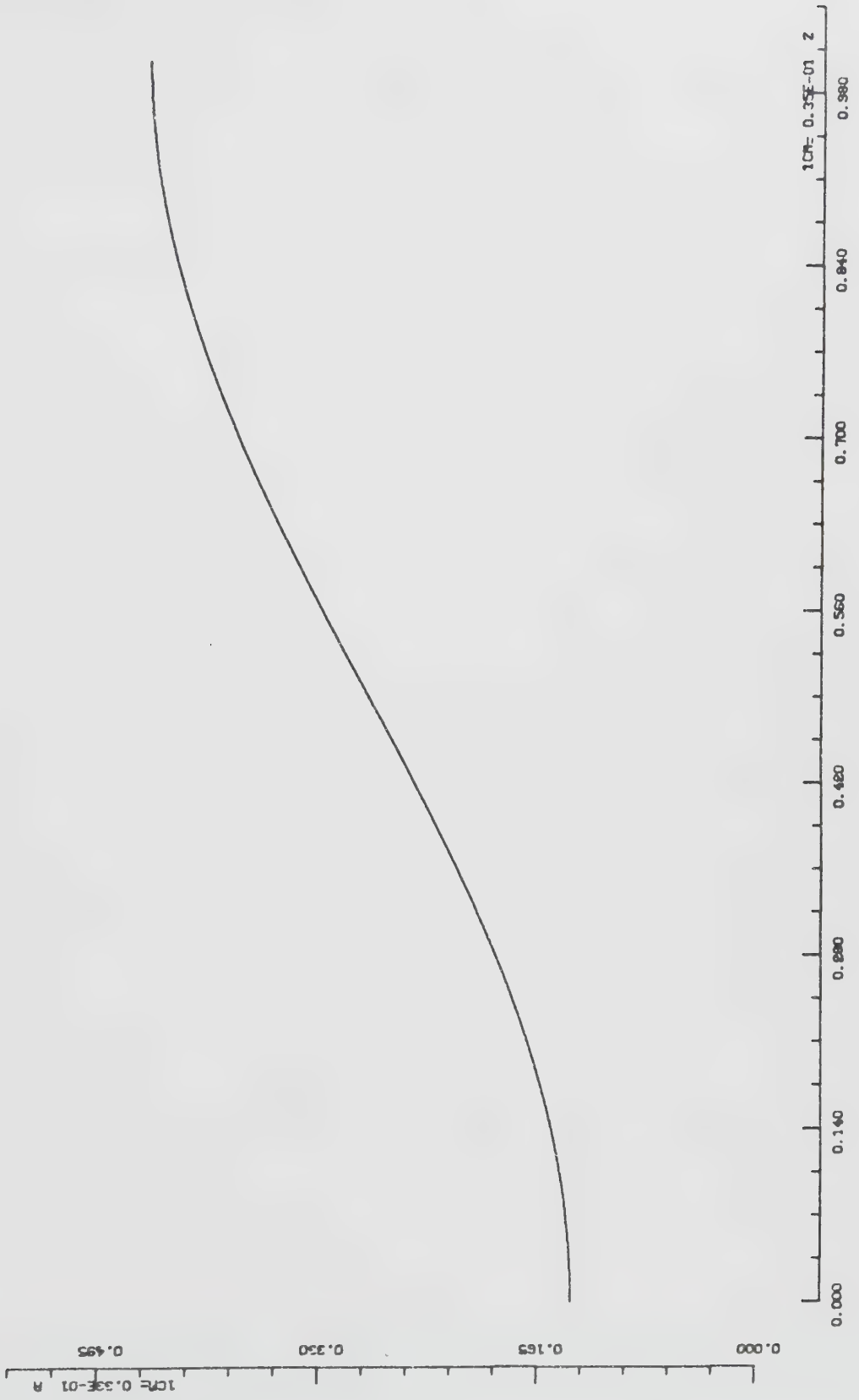


Fig. 2-2- REPONSE DE LA VANNE. A = F(β)

2.2.7. Ensemble de la boucle

On a donc, pour l'ensemble de la boucle, les équations suivantes :

$$W = \mu_u \frac{d\,\theta_u}{dt} + (k_6\ q + k_7)\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m})$$

$$\theta_{1m} = \frac{1}{2}\ (\theta_{em} + \theta_{sm})$$

$$C_p = 0{,}957 + 0{,}043\ \theta_{1m} \cdot 10^{-3}$$

$$(k_6\ q + k_7)\ C_p\ (\theta_u - \theta_{1m}) = 1{,}1\ q\ C_p\ \Delta\theta + \mu_1 \frac{d\,\theta_{1m}}{dt} \qquad (2\text{-}20)$$

$$\Delta\theta = \theta_{sm} - \theta_{em}$$

$$q\ C_p\ \Delta\theta = A(\beta)\ q\ C_p\ (1 - \frac{q}{q_o})\ (\theta_{sm} - \theta_o) + A(\beta)\ \mu_4 \frac{d\,\theta_{1m}}{dt}$$

Une série de simulations analogiques nous a permis de vérifier le bien fondé de ces équations, aussi bien en régime statique que dynamique, et de déterminer les valeurs des coefficients pour la boucle considérée.

Toutefois, lors d'une irradiation, on ne s'intéresse qu'à une seule température, en général la température maximale de gaine θ_u. En supposant q constant et en posant :

$$\theta = \theta_u - \theta_o$$

le système (2-20) se réduit à :

$$\frac{d^2\,\theta}{dt^2}\ (a+bA) + \frac{d\theta}{dt}\ (c+dA) + \theta\ e\ A = \frac{dW}{dt}\ (f+gA) + W(h+iA) \qquad (2\text{-}21)$$

avec :

$$a = \frac{\mu_u\ \mu_1}{1{,}1\ (k_6\ q + k_7)}$$

$$b = \frac{\mu_u}{k_6\ q + k_7}\ [\mu_4 - \frac{\mu_1}{2{,}2}\ (1 - \frac{q}{q_o})]$$

$$c = \frac{\mu_u + \mu_1}{1{,}1}$$

$$d = \mu_4 + q\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)\frac{\mu_u}{k_6\, q + k_7} - \frac{\mu_u + \mu_1}{2,2}\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)$$

$$e = q\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)$$

$$f = \frac{\mu_1}{1,1\ (k_6\, q + k_7)}$$

$$g = \frac{1}{k_6\, q + k_7}\left[\mu_u - \frac{\mu_1}{2,2}\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)\right]$$

$$h = \frac{1}{1,1}$$

$$i = q\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)\frac{1}{k_6\, q + k_7} - \frac{1}{2,2}\left(1 - \frac{q}{q_o}\right)$$

2.3. - EXPERIENCES REALISEES ET PROBLEME POSE

Les essais effectués sur les éléments combustibles ont essentiellement pour but, d'une part d'observer leur comportement en irradiation et leur vieillissement, d'autre part de déterminer leurs conditions limites d'utilisation, notamment celles pouvant entraîner une rupture de la gaine qui entoure le barreau d'uranium. On peut donc les classer en deux catégories :

a) les essais statiques qui consistent à laisser un élément en irradiation, à une température fixe, pendant un laps de temps assez long;

b) les essais dynamiques qui consistent principalement à effectuer des cycles thermiques ou "cyclages", c'est-à-dire des montées et descentes de température, à gradient constant, séparées par des paliers.

Pour que les résultats de ces expériences soient significatifs, il faut évidemment que les températures et leurs gradients soient parfaitement déterminés. Dans le cas d'une irradiation statique, la température de l'élément combustible doit rester constante malgré les perturbations extérieures : variation de la puissance pile, de la ré-

partition spatiale du flux neutronique, de la pression ou du débit du fluide de refroidissement etc...

De plus, au cours d'un cyclage, il est important que la dérivée de température reste fixe tout au long d'une rampe étant donné qu'elle joue un rôle prédominant dans le processus de rupture de gaine. En effet si, par exemple, la puissance débitée dans un barreau augmente trop rapidement, celui-ci s'échauffe et donc se dilate sans avoir le temps de transmettre sa chaleur à la gaine, d'où contrainte thermique et risque de rupture. Inversement un refroidissement trop brusque du gaz carbonique, donc de la gaine, peut entraîner les mêmes conséquences.

Initialement les expériences statiques étaient réalisées en laissant une boucle immobile au fond de la piscine, en position d'irradiation, avec une ouverture de la vanne de refroidissement donnée. La température de l'élément combustible irradié était donc très sensible aux diverses perturbations. D'où la nécessité, pour les opérateurs, de procéder à des réajustages périodiques de la position de la vanne.

Quant aux cyclages, ils sont toujours effectués manuellement. Un opérateur actionne une manivelle, située sur le bord de la piscine, permettant de déplacer la boucle par rapport au coeur, en suivant les instructions données à partir de la salle de commande, au vu de l'enregistrement du cyclage. On peut voir sur la figure 2-3 que cette méthode, malgré l'habileté des opérateurs, ne donne que des résultats médiocres.

La nécessité s'est donc faite sentir d'équiper le réacteur d'un système de commande automatique dans le but d'améliorer à la fois la précision des expériences et la sécurité de fonctionnement de l'ensemble.

Pour diverses raisons, cette étude a été scindée en deux parties:

1. étude et réalisation d'unités de régulation autonomes pour les boucles classiques EDF, EL4 et INCA. Ceci fait l'objet du chapitre 3.
2. étude d'un système de commande centralisée pouvant effectuer des cyclages sur toutes les boucles et une régulation sur les boucles de type HTR. Cette étude est décrite au chapitre 4.

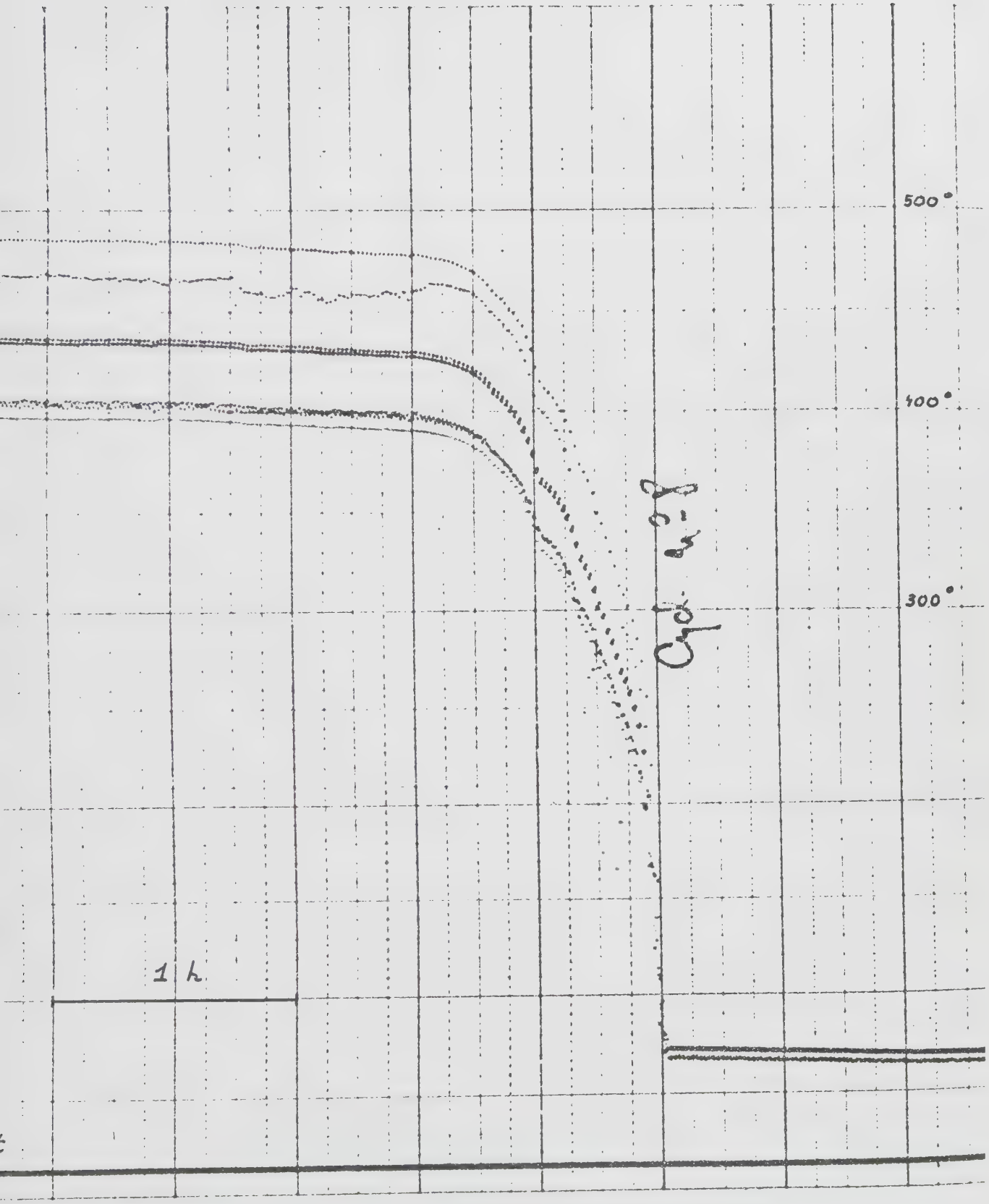


Fig. 2-3- CYCLAGE MANUEL. ENREGISTREMENT REEL

3 - UNITES DE REGULATION

3.1. - INTRODUCTION

Nous avons vu que les expériences statiques pouvaient avoir une durée très longue. Une unité de régulation doit donc être en mesure de fonctionner, sur une boucle donnée, pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, sans interruption. Elle doit donc présenter une sécurité de fonctionnement et une fiabilité très grandes et ne pas diminuer celles des ensembles expérimentaux. Ceci interdit l'emploi de la puissance W, donc du déplacement de boucle, comme variable de commande. En effet, dans ce cas, les boucles se déplaceraient constamment au fond de la piscine, au gré des perturbations, ce qui risquerait, à la longue, de les endommager. De plus, un accident (par exemple une chute des barres de contrôle) entraînerait des mouvements de boucles brusques et imprévisibles, ce qui serait incompatible avec les impératifs de sécurité. Par contre la variable β, c'est-à-dire la position de la vanne de refroidissement présente toutes les conditions requises :

- c'est un organe robuste;
- son champ d'efficacité est assez étendu pour contrebalancer l'effet de toutes les perturbations possibles;
- en cas de chute de barres la régulation s'opposera naturellement à la diminution de température, jusqu'au blocage de la vanne, ce qui évitera une élévation trop grande des dérivées de température qui risqueraient de déclencher une rupture de gaine.

3.2. - ETUDE THEORIQUE

3.2.1. Conception générale

En régime de régulation, la puissance W étant constante, l'équation (2-21) se réduit à :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}(a+bA) + \frac{d\theta}{dt}(c+dA) + \theta\, e\, A = W(h+iA) \qquad (3\text{-}1)$$

avec $$A = f(\beta)$$

Nous sommes donc en présence de deux types de non-linéarité, l'une due à la structure même de l'équation (3-1), l'autre à la relation entre A et β. Nous supposerons, en première approximation, que :

$$A = \beta$$

nous réservant pour plus tard d'introduire l'effet produit par la non linéarité.

A l'heure actuelle, les normes de refroidissement sont entraînées par des moteurs diphasés à vitesse fixe. Cependant, nous avons commencé l'étude en supposant ces moteurs à vitesse variable. Ceci nous a permis d'approximer ce système d'ordre trois (si l'on tient compte du moteur) par un système du 2° ordre pour lequel il est beaucoup plus facile d'introduire les non linéarités dues à la commande en "tout ou rien" et à la relation entre A et β.

Nous avons pris comme signal de commande une combinaison linéaire des variables d'état, c'est-à-dire dans le cas d'un moteur à vitesse variable.

$$\frac{d\beta}{dt} = k(\theta - \theta_c) + k'\frac{d}{dt}(\theta - \theta_c) \qquad (3\text{-}2)$$

k et k' étant des gains de contre-réaction,

θ_c étant la température de consigne, nous avons en régulation :

$$\frac{d\beta}{dt} = k(\theta - \theta_c) + k'\frac{d}{dt}\theta \qquad (3\text{-}3)$$

Les méthodes topologiques à trois dimensions nous ont semblé les plus efficaces pour l'étude d'un tel système.

3.2.2. Rappel des méthodes topologiques

L'étude des systèmes dynamiques non linéaires représentables dans un espace à trois dimensions est due aux travaux de L.SIDERIADES.

Les lignes qui suivent n'ont pour but que de donner une idée très générale de la méthode. Pour une connaissance plus approfondie, on pourra se reporter avec profit aux articles de L. SIDERIADES cités en référence [18] [19].

Soit un système de trois équations du premier ordre

$$\frac{dx}{dt} = X\ (x,y,z)$$

$$\frac{dy}{dt} = Y\ (x,y,z) \qquad (3\text{-}4)$$

$$\frac{dz}{dt} = Z\ (x,y,z)$$

ou :

$$\frac{dx}{X\ (x,y,z)} = \frac{dy}{Y\ (x,y,z)} = \frac{dz}{Z\ (x,y,z)} = dt \qquad (3\text{-}5)$$

où X, Y, Z sont des polynômes en x, y, z.

L'état du système est parfaitement défini à un instant donné par la position du point de coordonnées (x,y,z) dans l'espace des variables x, y, z. De même, l'évolution du système à partir d'une condition initiale est définie par une courbe graduée en t dans ce même espace. C'est une courbe intégrale du système.

L'étude de ce système peut donc se ramener à celle de ses courbes intégrales.

On appelle "surfaces de base" les surfaces X, Y, Z = 0 et "points singuliers" les points communs à ces surfaces. On voit que sur un point singulier le système (3-5) n'est plus défini. Du point de vue physique, un point singulier correspond toujours à une position d'équilibre puisque toutes les dérivées sont nulles, cet équilibre pouvant être stable ou instable.

Soit un point singulier O que nous prendrons comme origine. Au voisinage de O nous avons :

$$\begin{aligned} X(x,y,z) &= X'_x(o,o,o)x + X'_y(o,o,o)y + X'_z(o,o,o)z + f(x,y,z) \\ Y(x,y,z) &= Y'_x(o,o,o)x + Y'_y(o,o,o)y + Y'_z(o,o,o)z + g(x,y,z) \\ Z(x,y,z) &= Z'_x(o,o,o)x + Z'_y(o,o,o)y + Z'_z(o,o,o)z + h(x,y,z) \end{aligned} \quad (3\text{-}6)$$

où : $X'_x = \frac{\delta X}{\delta x}$, $X'_y = \frac{\delta X}{\delta y}$ etc...

On rend alors linéaire le système autour du point singulier en supposant négligeables f, g et h, soit, sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt}[x] = [A]\,[x] \quad (3\text{-}7)$$

On suppose que :

$$\frac{d}{dt}[x] = S\,[I]\,[x] \quad (3\text{-}8)$$

[I] étant la matrice unité.

Le système admettra des solutions non nulles seulement si :

$$[A] - S\,[I] = 0 \quad (3\text{-}9)$$

Soit :

$$\begin{vmatrix} X'_x - S & X'_y & X'_z \\ Y'_x & Y'_g - S & Y'_z \\ Z'_x & Z'_y & Z'_z - S \end{vmatrix} = 0 \quad (3\text{-}10)$$

ou encore : $$S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0 = 0 \quad (3\text{-}11)$$

La solution générale sera alors :

$$\begin{aligned} x &= A\, e^{S_1 t} + B\, e^{S_2 t} + C\, e^{S_3 t} \\ y &= \lambda_1 A\, e^{S_1 t} + \lambda_2\, B\, e^{S_2 t} + \lambda_3\, C\, e^{S_3 t} \\ z &= \mu_1 A\, e^{S_1 t} + \mu_2\, B\, e^{S_2 t} + \mu_3\, B\, e^{S_3 t} \end{aligned} \quad (3\text{-}12)$$

S_1 , S_2 , S_3 , racines de l'équation (3-11), sont les valeurs propres du système.

Les directions propres correspondantes sont déterminées par :

$$\begin{aligned} X'_x + \lambda\, X'_y + \mu\, X'_z &= S \\ Y'_x + \lambda\, Y'_y + \mu\, Y'_z &= \lambda S \\ Z'_x + \lambda\, Z'_y + \mu\, Z'_z &= \mu S \end{aligned} \qquad (3\text{-}13)$$

On étudie alors le signe et la réalité des racines de l'équation (3-11) pour déterminer la nature du point singulier.

On peut alors par diverses méthodes, notamment celle des isoclines, tracer les courbes intégrales régulières du système.

3.2.3. Application à l'étude de l'unité de régulation

A - Etude générale

Nous supposerons donc tout d'abord que :

$$A = \beta$$

et que la vanne est entraînée par un moteur à vitesse variable. Effectuons le changement de variable suivant :

$$\begin{aligned} \theta &= x \\ \frac{d\theta}{dt} &= y \\ A = \beta &= z \\ \theta_c &= x_o \end{aligned} \qquad (3\text{-}14)$$

Des équations (3-1) et (3-3) on tire le système :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y \\ \frac{dy}{dt} \cdot (a+bz) &= -xez - y(c+dz) + W(h+iz) \\ \frac{dz}{dt} &= k(x-x_o) + k'y \end{aligned} \qquad (3\text{-}15)$$

Posons :

$$\begin{aligned} \overline{X} &= y \\ \overline{Y} &= - xez - y\,(c+dz) + W\,(h+iz) \\ \overline{Z} &= k\,(x-x_o) + k'y \end{aligned} \tag{3-16}$$

Le système (3-15) devient, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a+bz & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{bmatrix} \tag{3-17}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{\overline{X}\,(a+bz)}{T} \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{\overline{Y}}{T} \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{\overline{Z}\,(a+bz)}{T} \end{aligned} \tag{3-18}$$

avec : $T = a + b\,z$

On pose alors :

$$\frac{dx}{X} = \frac{dy}{Y} = \frac{dz}{Z} = \frac{dt}{T} \tag{3-19}$$

avec :

$$\begin{aligned} X &= \overline{X}\,(a+bz) \\ Y &= \overline{Y} \\ Z &= \overline{Z}\,(a+bz) \end{aligned} \tag{3-20}$$

Les points singuliers des courbes intégrales se divisent en deux catégories :

a) les points singuliers du système statique; ce sont ceux pour lesquels :

$$\overline{X} = \overline{Y} = \overline{Z} = 0$$

On voit qu'il n'en existe qu'un de coordonnées :

$$\begin{aligned} x &= x_0 \\ y &= 0 \\ z &= z_0 = \frac{W\,h}{e\,x_0 - W\,i} \end{aligned} \qquad (3\text{-}21)$$

On définit ainsi un point A dans l'espace des variables (voir figure 3-1). C'est le seul qui puisse constituer une position d'équilibre stable.

b) les points singuliers du système dynamique; ce sont ceux pour lesquels :

$$X = Y = Z = 0$$

soit outre le point A, ceux qui satisfont :

$$z = z_1 = -\frac{a}{b} \qquad (3\text{-}22)$$

et : $$W\,(h+iz) - xez - y\,(c+dz) = 0 \qquad (3\text{-}23)$$

Ce système détermine une droite singulière Δ, intersection du plan $z = z_1$ et de la surface de base définie par (3-23).

Le plan $z = z_1$ est un "plan frontière" pour le système où $\frac{dy}{dt}$ devient infini sauf sur Δ.

Pour étudier la nature du point singulier A, on a intérêt à prendre ce point comme nouvelle origine en faisant la translation suivante des axes.

$$\begin{aligned} x &\longrightarrow x_0 + x \\ y &\longrightarrow 0 + y \\ z &\longrightarrow z_0 + z \end{aligned}$$

On a alors :

$$\begin{aligned} X &= y\,(a+b\,z_0+bz) \\ Y &= (Wi - x_0 e)z - cy - (ex+dy)\,(z+z_0) \\ Z &= (kx + k'y)\,(a+b\,z_0 + bz) \end{aligned} \qquad (3\text{-}24)$$

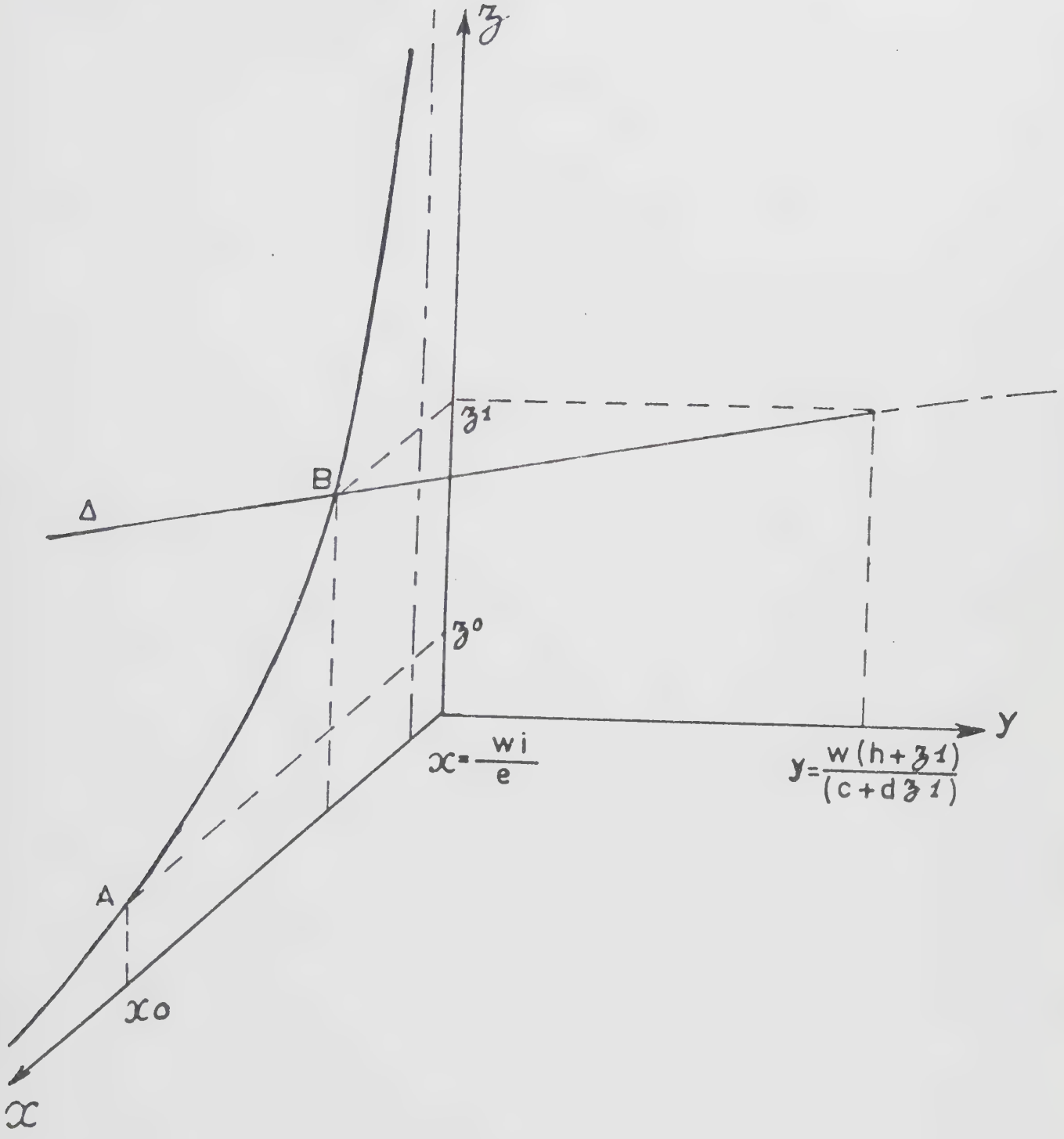


Fig. 3-1- ESPACE DE PHASE. DROITE ET POINT SINGULIERS

soit en linéarisant :

$$X = y\ (a+b\ z_0)$$

$$Y = (Wi - x_0 e)z - y\ (c+d\ z_0) - exz_0 \qquad (3\text{-}25)$$

$$Z = (kx + k'y)\ (a+b\ z_0)$$

L'équation aux valeurs propres en A est :

$$S^3 + a_2\ S^2 + a_1\ S + a_0 = 0 \qquad (3\text{-}11)$$

avec :

$$a_2 = c + d\ z_0$$

$$a_1 = (e\ z_0 + k'\ \frac{Wh}{z_0})(a+b\ z_0) \qquad (3\text{-}26)$$

$$a_0 = k\ \frac{Wh}{z_0}\ (a+b\ z_0)^2$$

Il reste maintenant à déterminer la nature du point singulier A en fonction des paramètres a_2, a_1 et a_0.

Une classification complète des divers types possibles de points singuliers dans un espace à trois dimensions a été faite pour la première fois par L. SIDERIADES [19]. Cette classification utilise les trois paramètres a_0, Σ et φ avec :

$$\Sigma = a_2\ a_1 - a_0 \qquad (3\text{-}27)$$

$$\varphi = 27\ a_0^2 - 2\ a_2\ (9\ a_1 - 2\ a_2^2)\ a_0 + a_1^2\ (4\ a_1 - a_2^2) \qquad (3\text{-}28)$$

La nature d'un point singulier est entièrement déterminée par le signe ou l'annulation de ces paramètres.

Nous avons utilisé ici les dénominations données aux points singuliers par L. SIDERIADES, mais employé pour les déterminer une méthode différente : la méthode de MITROVIC [9]. Celle-ci a l'avantage, surtout dans le domaine de l'automatisme, de fournir un renseignement supplémentaire, à savoir la valeur du coefficient d'amortissement du système, du moins lorsque celui-ci a un sens physique.

La méthode de MITROVIC consiste à mettre S sous la forme :

$$S = - \zeta \omega_n + j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \qquad (3\text{-}29)$$

où ζ représente le coefficient d'amortissement du système et ω_n sa pulsation propre. Si on développe l'équation (3-11) en isolant la partie réelle et la partie imaginaire, on obtient le système :

$$\begin{aligned} a_0 - a_2 \omega_n^2 + 2 \zeta \omega_n^3 &= 0 \\ -a_1 + 2 a_2 \zeta \omega_n - \omega_n^2 (4 \zeta^2 - 1) &= 0 \end{aligned} \qquad (3\text{-}30)$$

Pour un ζ donné, et en faisant varier ω_n de 0 à $+\infty$, on obtient une surface dans l'espace paramétrique (a_0, a_1, a_2). En général on a intérêt à se fixer une valeur de a_2 et à tracer, dans le plan (a_0, a_1), la courbe intersection de celui-ci et de la surface.

La nature d'un point singulier est déterminée par le signe et la réalité des racines de l'équation (3-11). En particulier, le système sera stable si toutes les racines ont une partie réelle négative. Le critère de ROUTH-HURWITZ, par exemple, montre que, pour un système du troisième ordre, les conditions de stabilité sont :

$$\begin{aligned} \zeta &> 0 \\ a_0 &> 0 \\ a_2 &> 0 \end{aligned} \qquad (3\text{-}31)$$

On s'aperçoit, d'ailleurs, en examinant (3-30) que la condition $a_2 > 0$ est incluse dans les deux premières.

Les surfaces délimitant la zone de stabilité ont donc pour équations :

$$\zeta = 0 \qquad (3\text{-}32)$$

et

$$a_0 = 0 \qquad (3\text{-}33)$$

On remarque que le fait d'annuler ζ dans le système (3-30) entraîne l'égalité :

$$\Sigma = 0$$

dans l'expression (3-27). Toutefois le système (3-30) impose deux

conditions supplémentaires :

- a_0 est du même signe que a_2
- a_1 est positif.

D'autre part, l'expression (3-29) montre que la condition limite de réalité des racines correspond à :

$$\mathcal{J} = \pm 1$$

On peut vérifier qu'alors le système (3-30) est équivalent à l'équation (3-28) avec :

$$\varphi = 0$$

Nous avons donc remplacé l'étude des paramètres Σ et φ par celle des surfaces données par le système (3-30) avec $\mathcal{J} = 0$ et $\mathcal{J} = \pm 1$.

Les figures 3-2-a, 3-2-b, 3-2-c donnent l'allure de ces courbes dans le plan (a_0, a_1) avec respectivement :

$$a_2 > 0$$

$$a_2 = 0$$

$$a_2 < 0$$

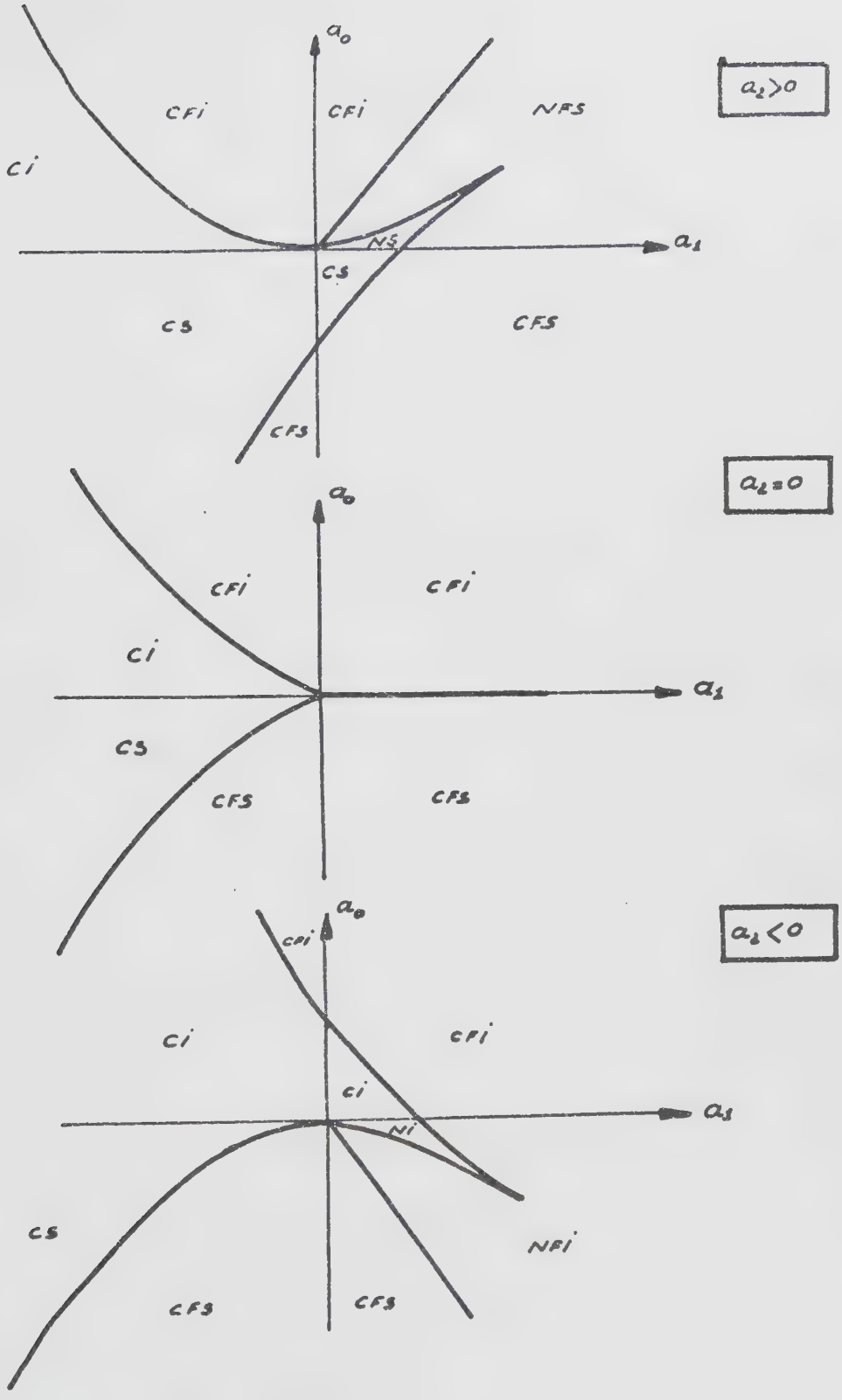
La détermination de la nature des points singuliers ainsi délimités peut se faire facilement à l'aide du théorème de DESCARTES relatif au nombre de racines positives ou négatives d'une équation du n° ordre. La dénomination des divers types de points singuliers est indiquée sur les figures 3-2. Une représentation de ces derniers est donnée dans l'article [19] déjà cité.

B - Exemple : boucle EDF 3

Dans le cas de la boucle EDF 3 déjà étudiée, les coefficients de l'équation (3-1) ont les valeurs suivantes :

$a = 850$, $b = -276$, $c = 50$, $d = -0,6$, $e = 0,833$, $h = 0,91$, $i = 2$.

On peut remarquer, sur le système (3-26), d'une part, que a_2 ne dépend



Légende :

N = Noeud
F = Foyer
C = Col
S = Stable
I = Instable

} Exemple : CFi = Col.foyer.instable

Fig. 3-2- PLAN PARAMETRIQUE. NATURE DES POINTS SINGULIERS

pas des gains k et k' de contre-réaction, d'autre part que, dans le cas présent :

$$a_2 = 50 - 0{,}6\ z_o \ , \quad 0 \leqslant z_o \leqslant 1$$

c'est-à-dire :

$$a_2 \simeq 50$$

Le système (3-30) devient :

$$\begin{aligned} a_o &= 50\ \omega_n^2 - 2\ \zeta\ \omega_n^3 \\ a_1 &= 100\ \zeta\ \omega_n - \omega_n^2\ (4\zeta^2 - 1) \end{aligned} \tag{3-34}$$

On peut donc tracer dans le plan (a_o, a_1) les courbes correspondant à différentes valeurs de ζ. Dans le cas présent, et en général en automatisme, seule nous intéresse la portion du plan qui correspond à des points d'équilibre stable, c'est-à-dire un "noeud stable", un "noeud-foyer stable" ou, à l'amortissement critique, un "noeud noeud-foyer stable" [19]. Les figures 3-2 montrent que l'on peut ainsi se limiter à la zone :

$$a_o \geqslant 0 \ , \quad a_1 \geqslant 0$$

La figure 3-3 donne le tracé des courbes correspondant à $\zeta = 0$; 0,5; 0,707 ; 1.

Pour des conditions de fonctionnement données, on peut déduire du système (3-26) les valeurs correspondantes des gains k et k'. On a en effet :

$$\begin{aligned} k' &= \frac{z_o}{W\ h\ (a+b\ z_o)}\ a_1 - \frac{e\ z_o^2}{Wh} \\ k &= \frac{z_o}{W\ h\ (a+b\ z_o)^2}\ a_o \end{aligned} \tag{3-35}$$

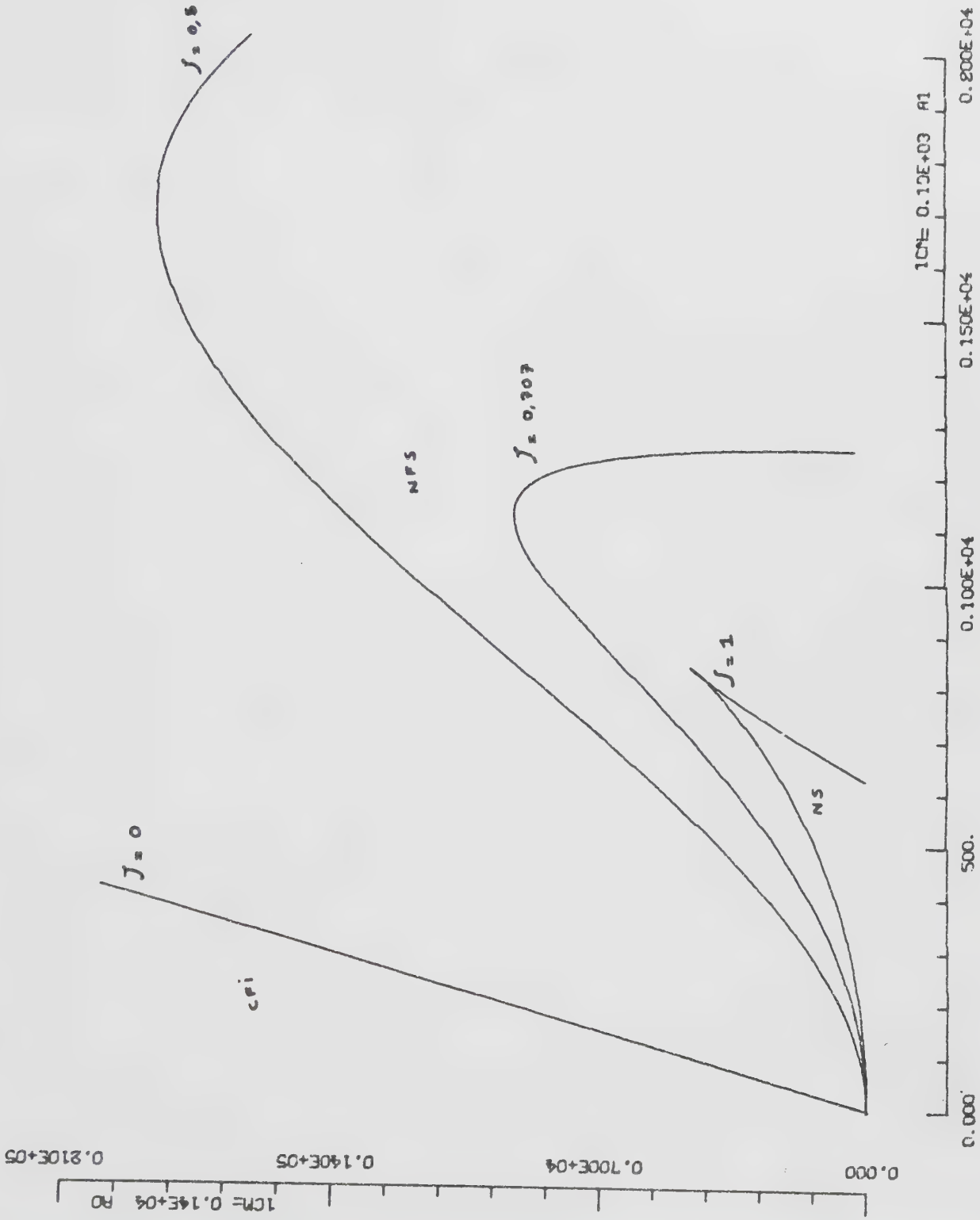


Fig. 3-3- PLAN PARAMETRIQUE. COURBES D'AMORTISSEMENT

L'étude de la nature du point singulier nous a permis de déterminer la stabilité et l'amortissement du système en fonction de ses paramètres, mais ceci n'est valable qu'au voisinage de ce point singulier. Il faut donc à present examiner l'allure des courbes intégrales dans tout l'espace de phase. Nous avons vu que la principale caractéristique est la présence du plan-frontière et de la droite singulière Δ. Sur ce plan-frontière le système présente une discontinuité, la dérivée de y par rapport au temps devenant infinie. Dans l'espace des variables d'état, on constate que le point figuratif se déplace avec une vitesse infinie et vient se caler sur la droite singulière Δ. Ce phénomène, que l'on peut facilement déduire de l'examen du système (3-15), a été également observé en simulation analogique. Il semble donc, a priori, très important de préciser dans quelles conditions il peut se produire, précisément pour les éviter. En réalité, dans le cas de la boucle EDF 3, ce plan-frontière correspond à:

$$z_1 = 3{,}08$$

c'est-à-dire à une valeur d'ouverture de la vanne qui ne correspond à rien, du point de vue physique, puisque par définition z est compris entre 0 et 1. Bien entendu on ne peut pas absolument exclure le cas où, pour une boucle différente, z_1 serait compris entre ces deux bornes.

Cependant, selon toute vraisemblance, on peut supposer qu'alors le modèle mathématique ne serait plus représentatif du fonctionnement de la boucle en question.

Les méthodes topologiques sont essentiellement d'ordre graphique. Or, si la représentation des courbes intégrales sur un plan de phase ne pose pas de problèmes majeurs, il n'en est pas de même pour un système du troisième ordre. L'utilisation de deux plans de projection orthogonaux nécessite de repérer chaque courbe intégrale et ne donne pas une image très claire de l'évolution du système.

C'est pourquoi nous avons mis au point un programme numérique, écrit en FORTRAN IV, permettant d'obtenir une vue en perspective des courbes à partir d'un point choisi.

Un programme principal, écrit dans le même langage, intègre le système (3-15) à partir de conditions initiales données. Une fois les courbes intégrales obtenues il est alors possible de faire tracer plusieurs vues en perspective en modifiant le point de vue.

Les exemples qui suivent correspondent aux conditions de fonctionnement suivantes :

$$W = 70 \text{ kW}$$

$$x_0 = 360°C$$

on en déduit :

$$z_0 = 0,4$$

Le point singulier A a donc pour coordonnées :

$$x = x_0 = 360°C$$

$$y = y_0 = 0 \text{ °C/s}$$

$$z = z_0 = 0,4$$

Les figures 3-4, 3-5, 3-6 et 3-7 correspondent à

$$k = 0,78\ 10^{-4}$$

$$k' = 0,415\ 10^{-2}$$

c'est-à-dire :

$$a_0 = 6\ 800$$

$$a_1 = 735$$

La figure 3-3 indique que l'on a affaire à un noeud-foyer stable avec un coefficient d'amortissement d'environ 0,5. On peut constater que les changements des coordonnées du point de vue permettent d'avoir une idée précise de l'allure des courbes intégrales. Le point représentatif évolue, à partir d'une condition initiale, de façon régulière et se stabilise assez rapidement.

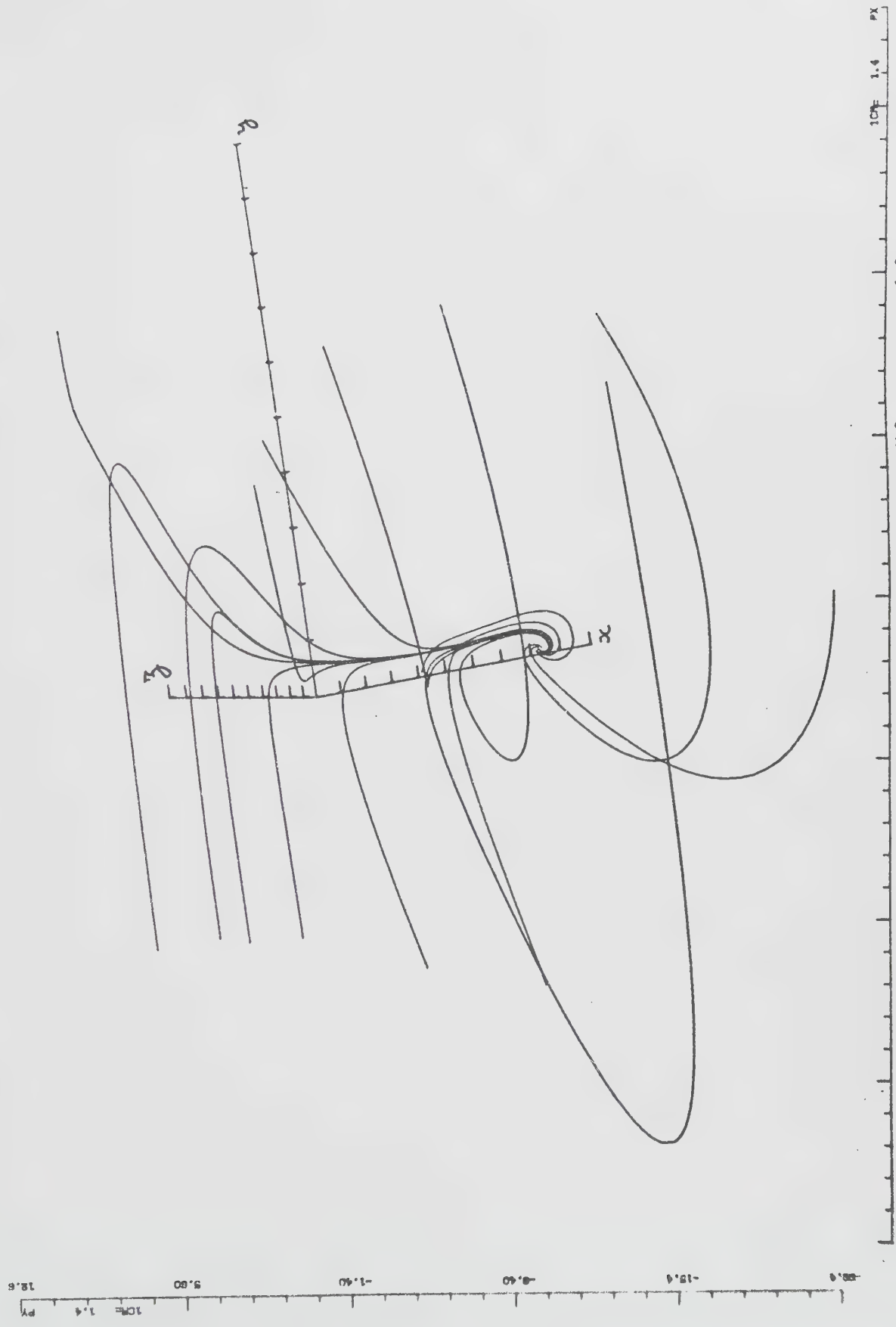


Fig. 3-4- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

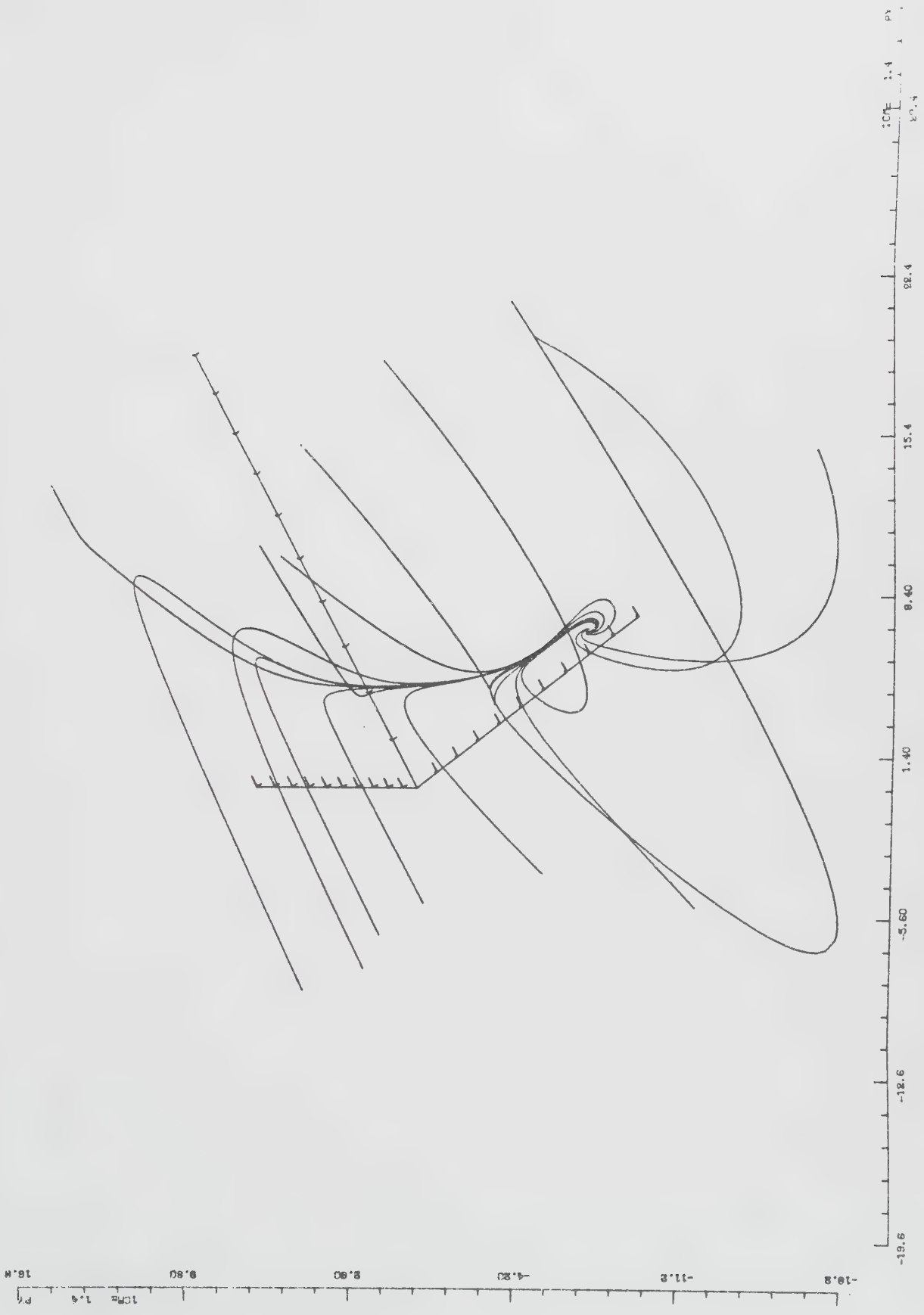


Fig. 3-5- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

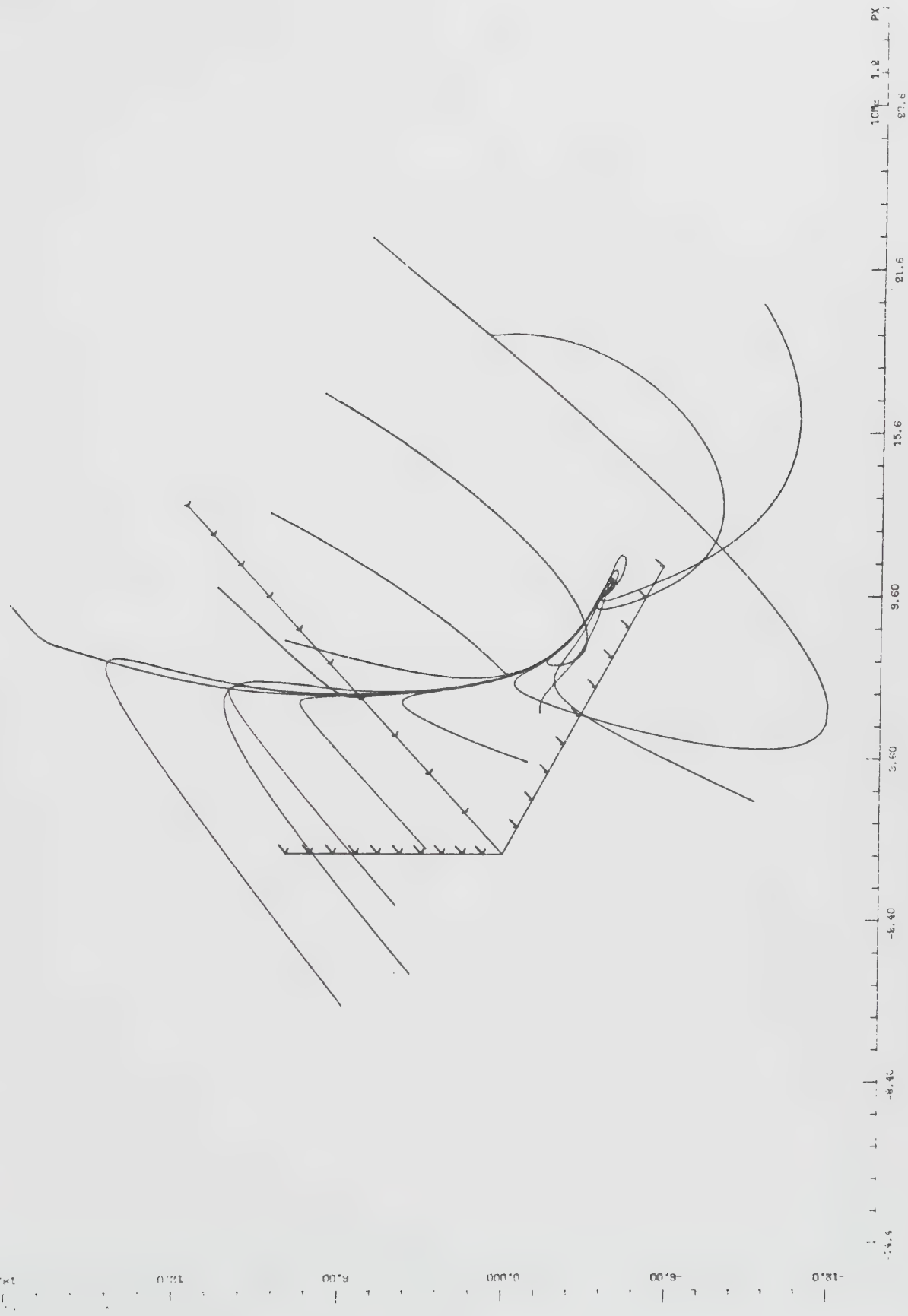


Fig. 3-6- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

Fig. 3-7- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

Les figures 3-8 et 3-9 correspondent à :

$$k = 0{,}208\ 10^{-4}$$

$$k' = 0{,}33\ 10^{-1}$$

et :

$$a_0 = 1\ 820$$

$$a_1 = 4\ 140$$

Le point singulier est toujours un noeud-foyer stable avec un coefficient d'amortissement inférieur à 0,5. Cet exemple est caractérisé par la valeur élevée de k' par rapport à k. Le système oscille rapidement jusqu'à annuler pratiquement la dérivée et se rapproche ensuite très lentement de sa position d'équilibre.

La figure 3-10 représente l'évolution du système pour :

$$k = 0{,}145\ 10^{-2}$$

$$k' = 0{,}33\ 10^{-1}$$

et :

$$a_0 = 127\ 000$$

$$a_1 = 4\ 140$$

Ici aussi le système est également oscillant mais la valeur relativement très élevée de k change complètement la nature de cette oscillation qui est centrée pratiquement sur le point singulier.

Enfin, les figures 3-11 et 3-12 ont été tracées pour :

$$k = 0{,}208\ 10^{-4}$$

$$k' = 0{,}33\ 10^{-2}$$

c'est-à-dire :

$$a_0 = 1\ 820$$

$$a_1 = 635$$

Le coefficient d'amortissement est égal à 1, le point singulier est alors un noeud-noeud-foyer stable [19].

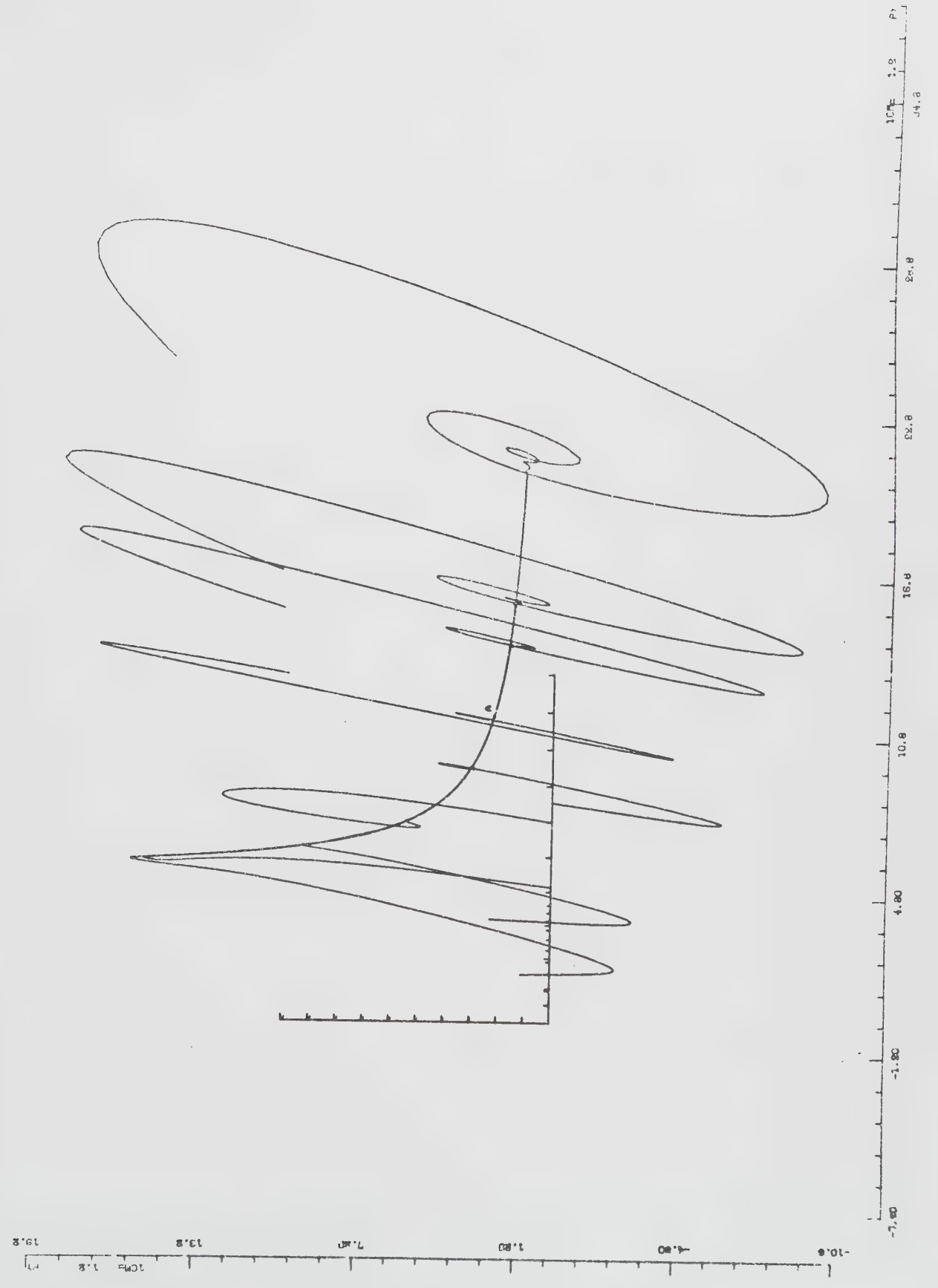


Fig. 3-8- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

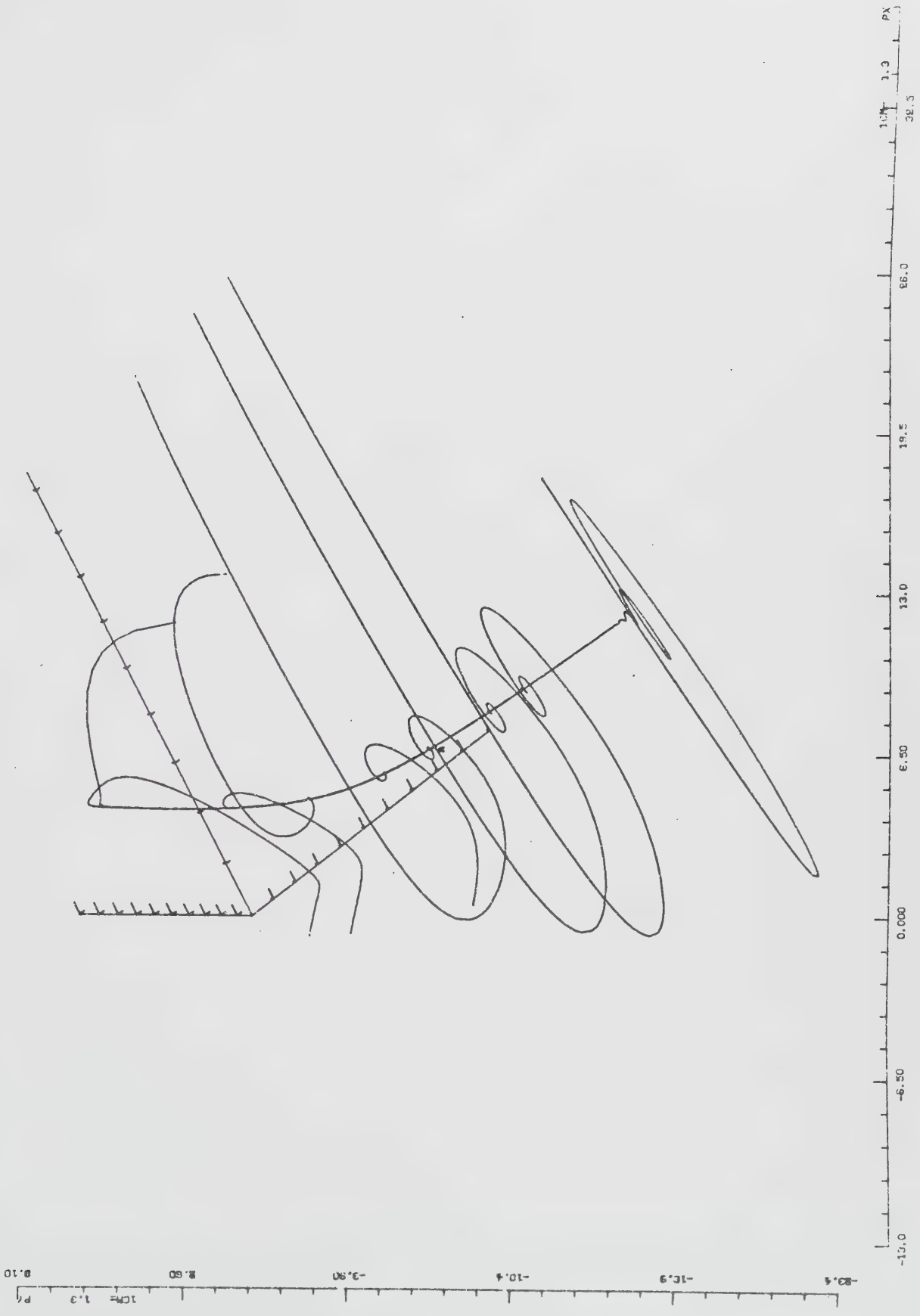


Fig. 3-9- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

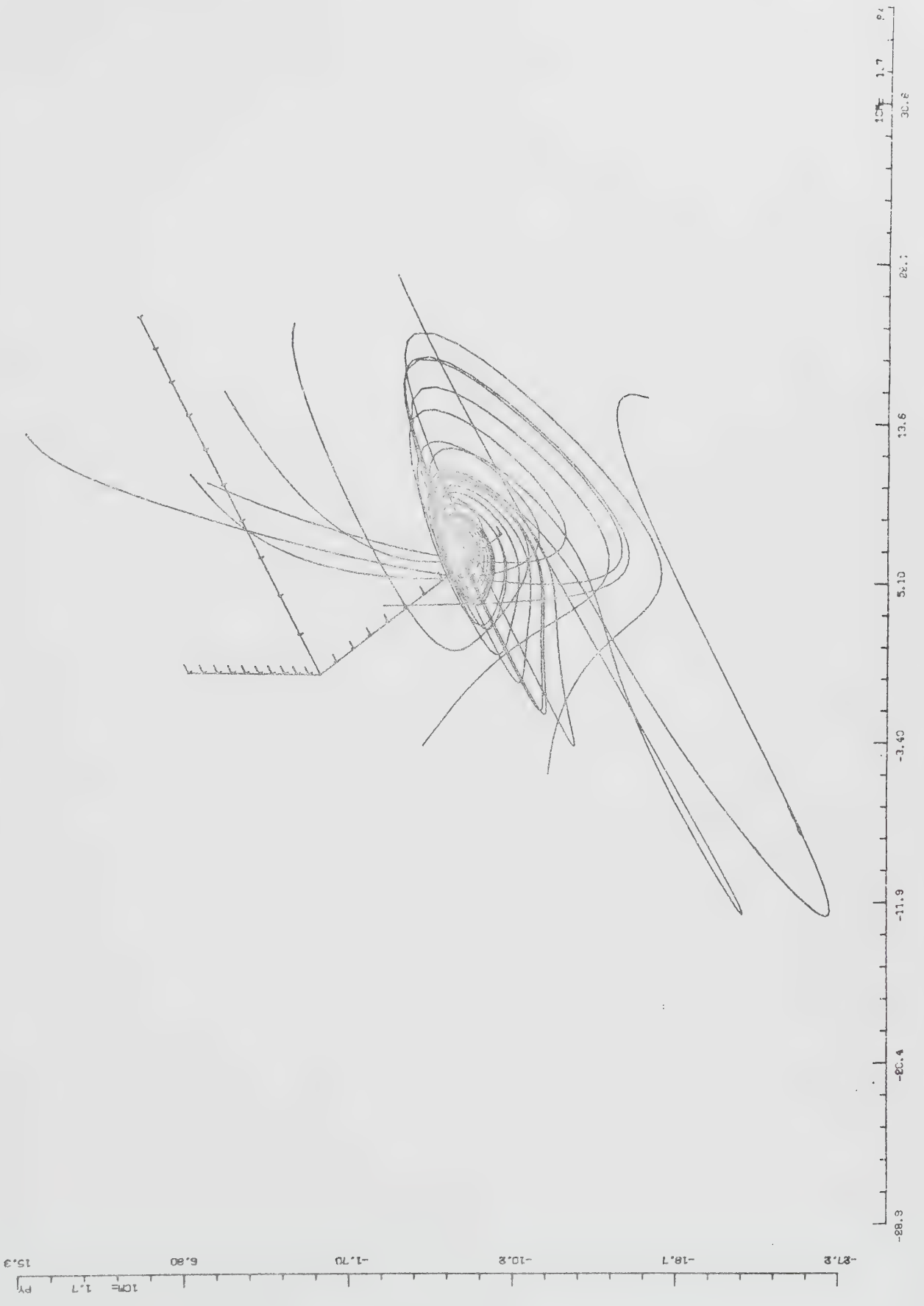


Fig. 3-10- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

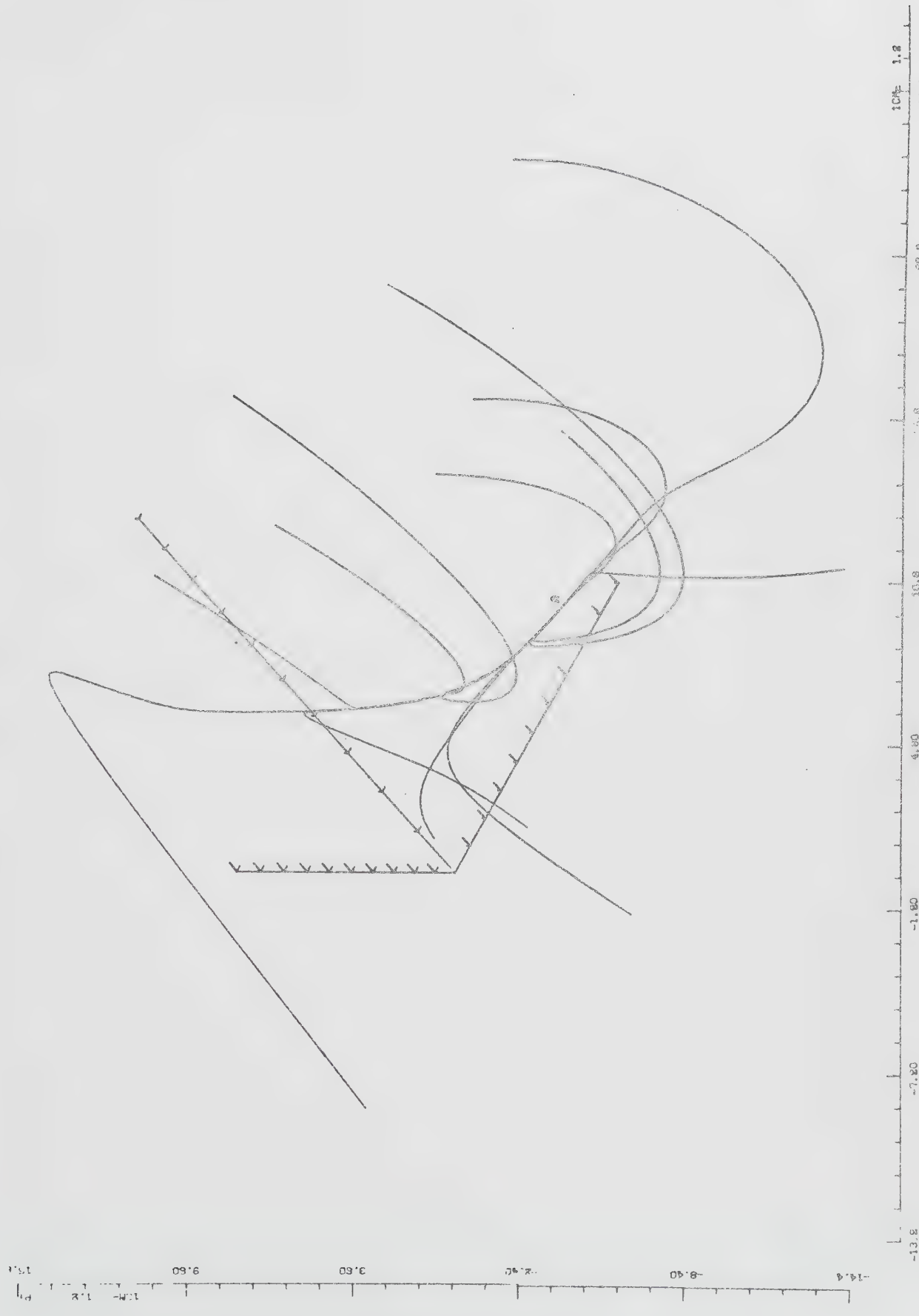


Fig. 3-11- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

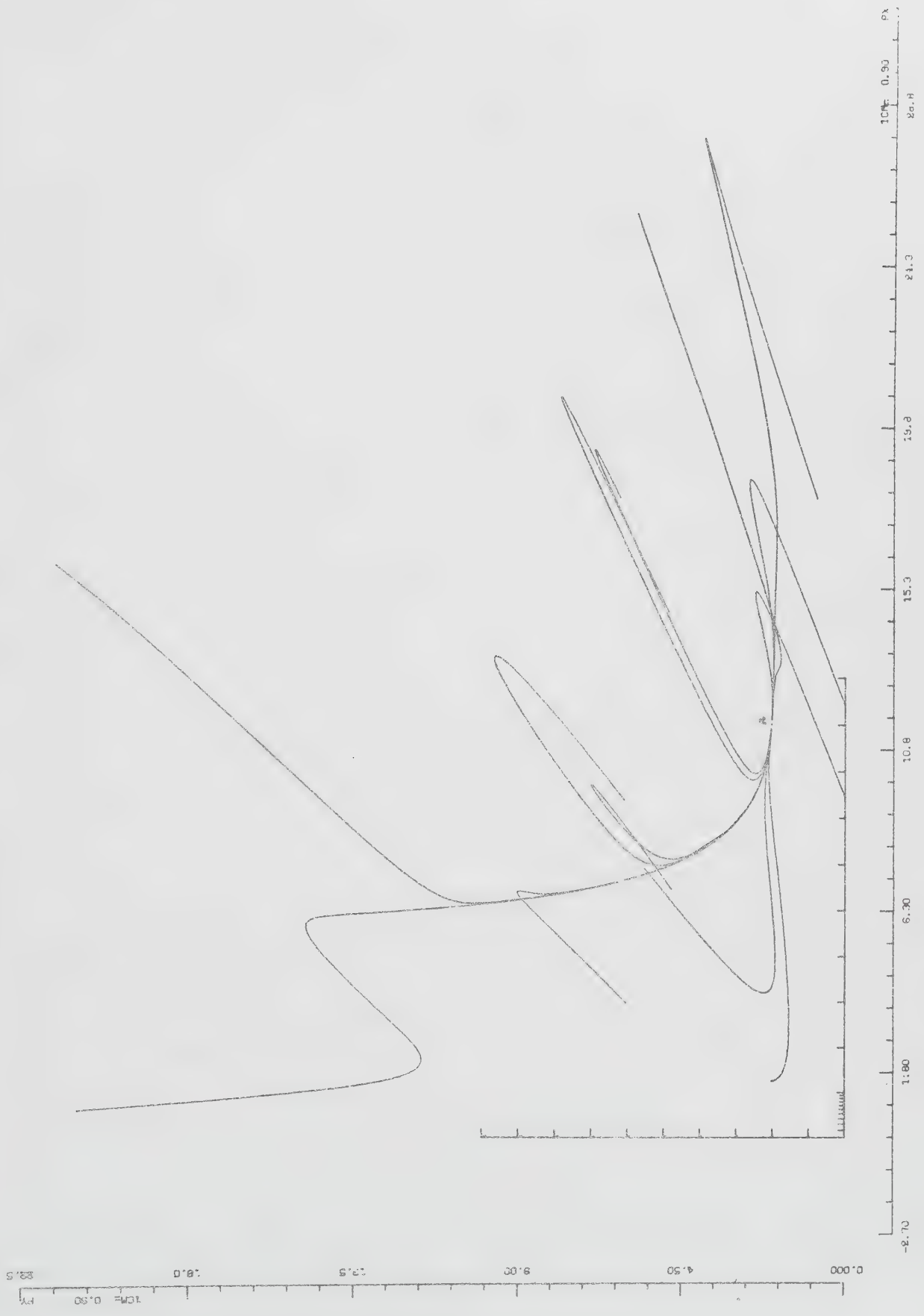


Fig. 3-12- ESPACE DE PHASE. VUE EN PERSPECTIVE

C - Approximation du second ordre

L'étude ci-dessus a été faite en supposant :

$$A = \beta$$

et $$\frac{d\beta}{dt} = k(x-x_o) + k'y$$

En fait, nous avons vu au chapitre 2 que la vanne présentait un effet de saturation aux extrémités approximé par la relation :

$$A = 0,16\left[1 - \cos (\pi z)\right] + 0,14 \qquad (3\text{-}36)$$

D'autre part les moteurs d'entraînement des vannes étant à vitesse fixe la commande doit se faire par l'intermédiaire d'un relais, donc en tout ou rien.

L'introduction de ces deux types de non-linéarité pose un certain nombre de problèmes quand on travaille dans l'espace d'état. Il serait donc intéressant de pouvoir se ramener à un problème à deux dimensions.

Or on remarque sur les figure précédentes que, assez rapidement, les courbes intégrales ont tendance à se confondre avec la surface de base $X = 0$. On a alors :

$$\frac{dy}{dt} \simeq 0$$

Il est donc possible de supposer, sans grande erreur, que le point représentatif du système évolue en permanence sur cette surface de base.

Le système (3-15) devient, dans ces conditions :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt}(c+dz) &= - xez + W(h+iz) \\ \frac{dz}{dt} &= k(x-x_o) + k'\frac{dx}{dt} \end{aligned} \qquad (3\text{-}37)$$

On retrouve le même point singulier A que précédemment, et une droite frontière correspondant à :

$$z_2 = - \frac{c}{d}$$

et un point singulier dynamique situé sur cette droite avec :

$$x = W \frac{h + i\ z_2}{e\ z_2}$$

L'application numérique montre que cette droite frontière est très éloignée de la zone de fonctionnement réel de la vanne.

Pour conserver une échelle de temps identique à celle du système du 3° ordre, il est nécessaire d'écrire (3-37) sous la forme :

$$\frac{dx}{X} = \frac{dz}{Z} = \frac{dt}{T}$$

avec : $T = a + bz$

La linéarisation autour du point singulier entraîne :

$$\begin{aligned} X &= \frac{a + b\ z_o}{c + d\ z_o} \left[- \frac{W\ h}{z_o} z - ex\ z_o \right] \\ Z &= (a+b\ z_o) \left[x \left(k - k' \frac{e\ z_o}{c + d\ z_o} \right) - \frac{W\ h}{(c+dz_o)z_o} \right] \end{aligned} \qquad (3\text{-}38)$$

On peut obtenir, d'ailleurs, ce résultat directement à partir du système (3-25) avec $Y = 0$.

L'équation caractéristique devient dans le cas présent :

$$S^2 + a_1' S + a_o' = 0$$

avec :

$$\begin{aligned} a_o' &= \frac{(a+b\ z_o)^2}{c + d\ z_o} k \frac{W\ h}{z_o} \\ a_1' &= \frac{a + b\ z_o}{c + d\ z_o} \left[e\ z_o + k' \frac{W\ h}{z_o} \right] \end{aligned} \qquad (3\text{-}39)$$

L'utilisation de la méthode de MITROVIC donne les relations :

$$\begin{aligned} a_o' &= \omega_n^2 \\ a_1' &= e\ \rho\ \omega_n \end{aligned} \qquad (3\text{-}40)$$

On peut alors déduire, de la même façon que précédemment, la nature du point singulier en fonction de a_o' et a_1'.

La figure 3-13 montre, dans le plan paramétrique (k,k'), pour $\delta = 0,5$; 0,707 et 1, en trait plein les courbes correspondant au système de 3° ordre et en trait pointillé celles déduites de (3-39) et (3-40). On constate que ces deux types de courbes demeurent voisines tant que k' ne devient pas trop grand. Cette réserve faite on peut donc estimer que pour des réglages identiques les deux systèmes possèdent des points singuliers de même nature et sensiblement le même coefficient d'amortissement.

Les figures 3-14-a et 3-14-b permettent de comparer l'allure des courbes intégrales dans les deux cas pour :

$$k = 0,143\ 10^{-4}$$

$$k' = 0,228\ 10^{-2}$$

et montrent que cette similitude se conserve sur tout le plan (x,z), ou du moins dans la zone correspondant à un fonctionnement réel.

D - Introduction des non-linéarités

Nous avons vu que ces non-linéarités sont au nombre de deux :

- d'une part le phénomène de saturation observé sur la vanne de refroidissement;
- d'autre part le fait que la commande est du type "tout-ou-rien".

La figure 3-15, tracée dans les mêmes conditions que la précédente, montre l'effet de la saturation sur l'allure des courbes intégrales. On constate, comme on pouvait s'y attendre, que cet effet est négligeable au voisinage du point singulier. Celui-ci n'occupe plus la même position dans le plan étant donné que si A a toujours la même valeur que dans le cas linéaire, on a maintenant, d'après (3-36) :

$$z = \frac{1}{\pi} \text{Arc cos } (1 - \frac{A - 0,14}{0,16})$$

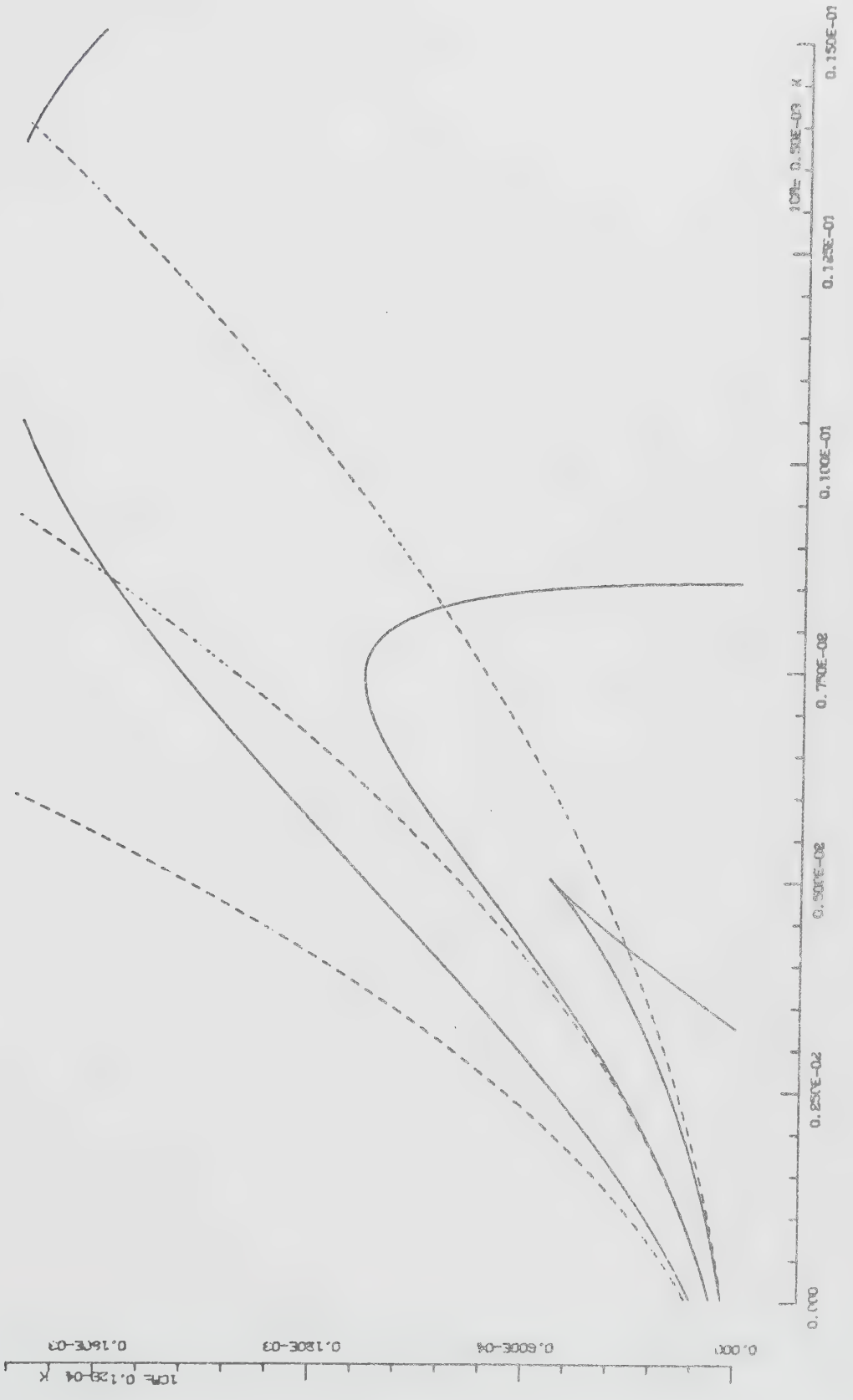


Fig. 3-13- PLAN PARAMETRIQUE. COURBES DU 2° ET 3° ORDRE

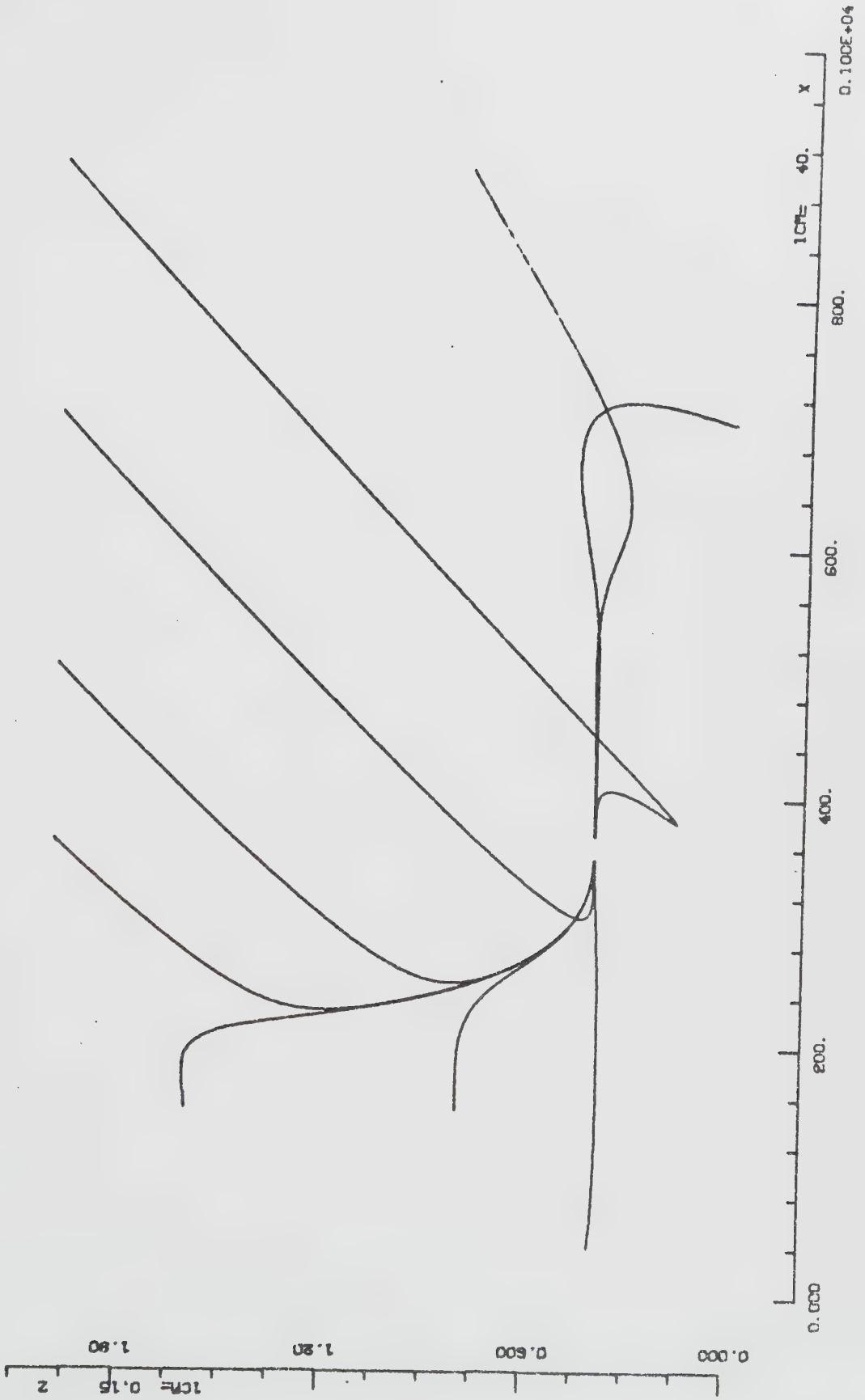


Fig. 3-14-a- PLAN DE PHASE. SYSTEME DU 3° ORDRE

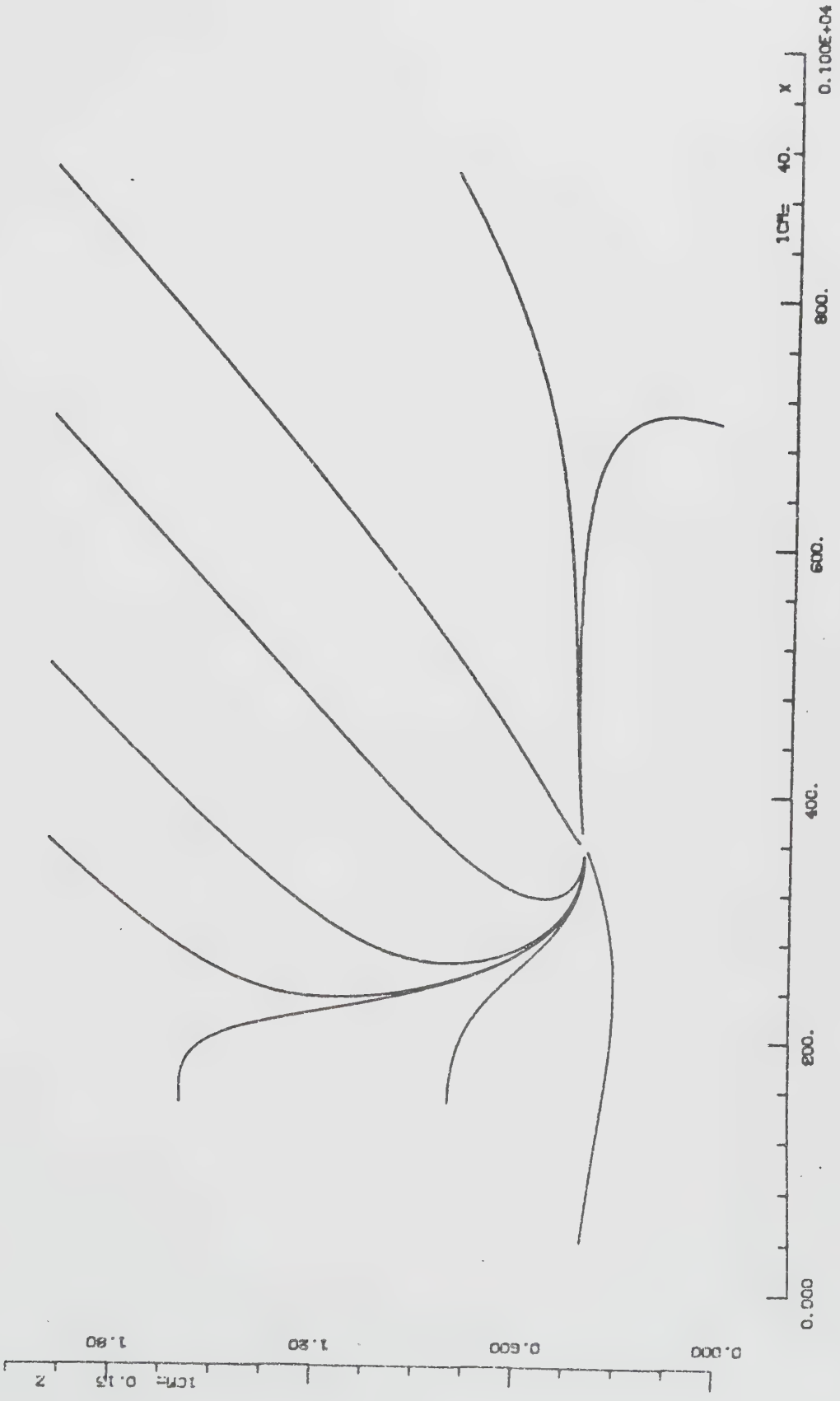


Fig. 3-14-b- PLAN DE PHASE. SYSTEME DU 2° ORDRE

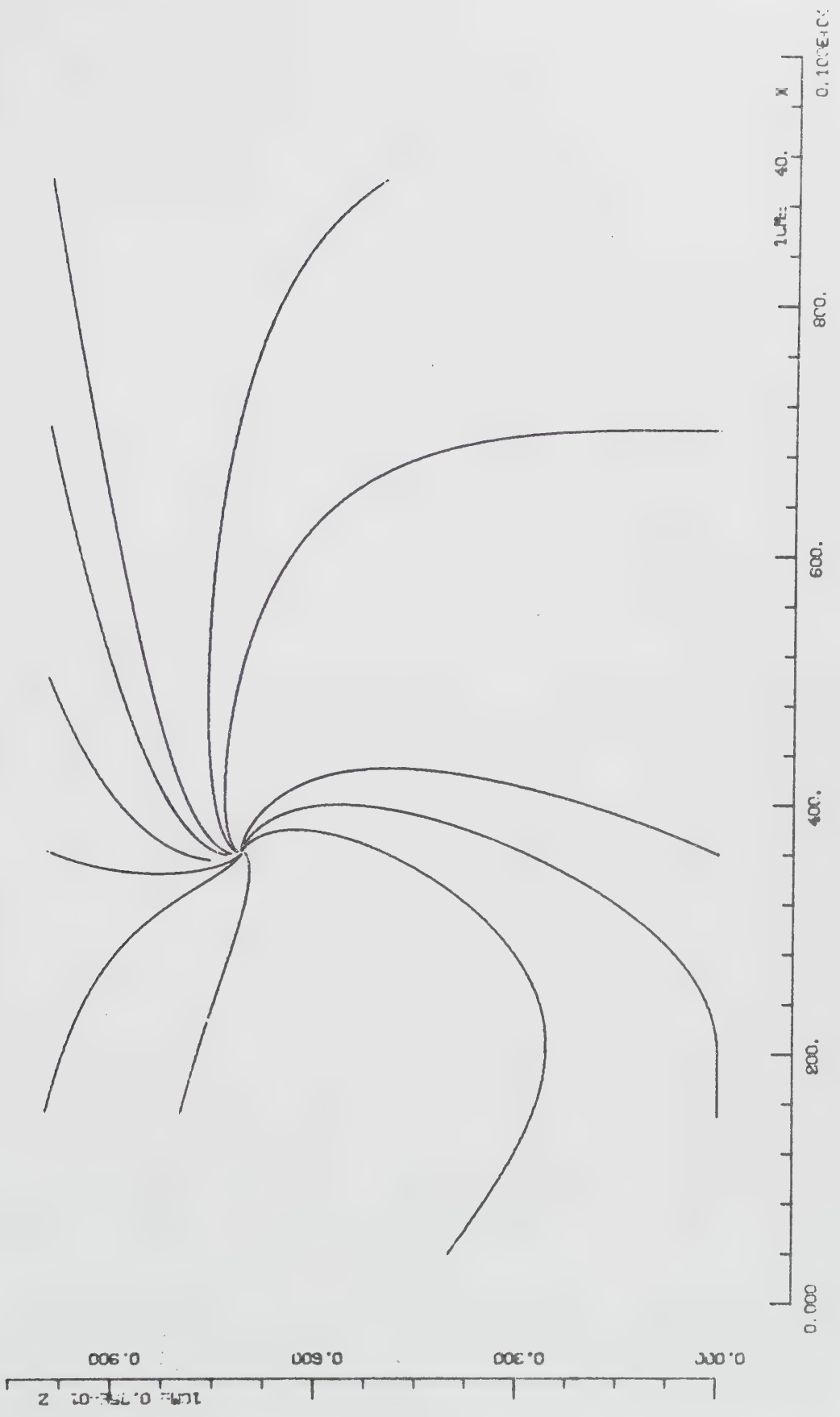


Fig. 3-15- PLAN DE PHASE. EFFET DE LA NON-LINERARITE DE LA VANNE

Il est d'ailleurs plus pratique, quand on travaille sur le plan de phase d'utiliser la méthode des isoclines qui permettent un travail plus rapide sur ordinateur et une vue plus générale du comportement du système. La figure 3-16 qui correspond à la précédente en est l'illustration.

Le fait de commander la vanne à l'aide d'un relais conduit à l'équation :

$$\frac{dz}{dt} = u \qquad (3\text{-}41)$$

avec :

$u = +V$ si $k\,(x-x_0) + k'\,\frac{dx}{dt} > S$

$u = 0$ si $S > k\,(x-x_0) + k'\,\frac{dx}{dt} > -S$

$u = V$ si $-S > k\,(x-x_0) + k'\,\frac{dx}{dt}$

où V représente la vitesse de rotation de la vanne et S le seuil du relais. On se trouve donc en présence de deux courbes de commutation correspondant à :

$$k\,(x-x_0) + k'\,\frac{-x\ e\ A + X\ (h+i\ A)}{c + d\ A} = \pm\ S$$

ou :

$$x - x_0 + \frac{k'}{k}\,\frac{-x\ e\ A + W\ (h+i\ A)}{c + d\ A} = \pm\ \frac{S}{k} \qquad (3\text{-}42)$$

L'allure de ces courbes de commutation dépend donc des valeurs des deux paramètres $\frac{k'}{k}$ et $\frac{S}{k}$. Dans chacune des trois zones ainsi délimitées dans le plan de phase, l'évolution du système est uniquement fonction de la vitesse de rotation V. Celle-ci est fixée pour une boucle donnée mais sa valeur peut varier dans des proportions relativement importantes d'une boucle à l'autre.

L'influence des réglages sur l'allure des courbes de commutation est illustrée par les figures suivantes, représentant le tracé des courbes isoclines dans le plan de phase.

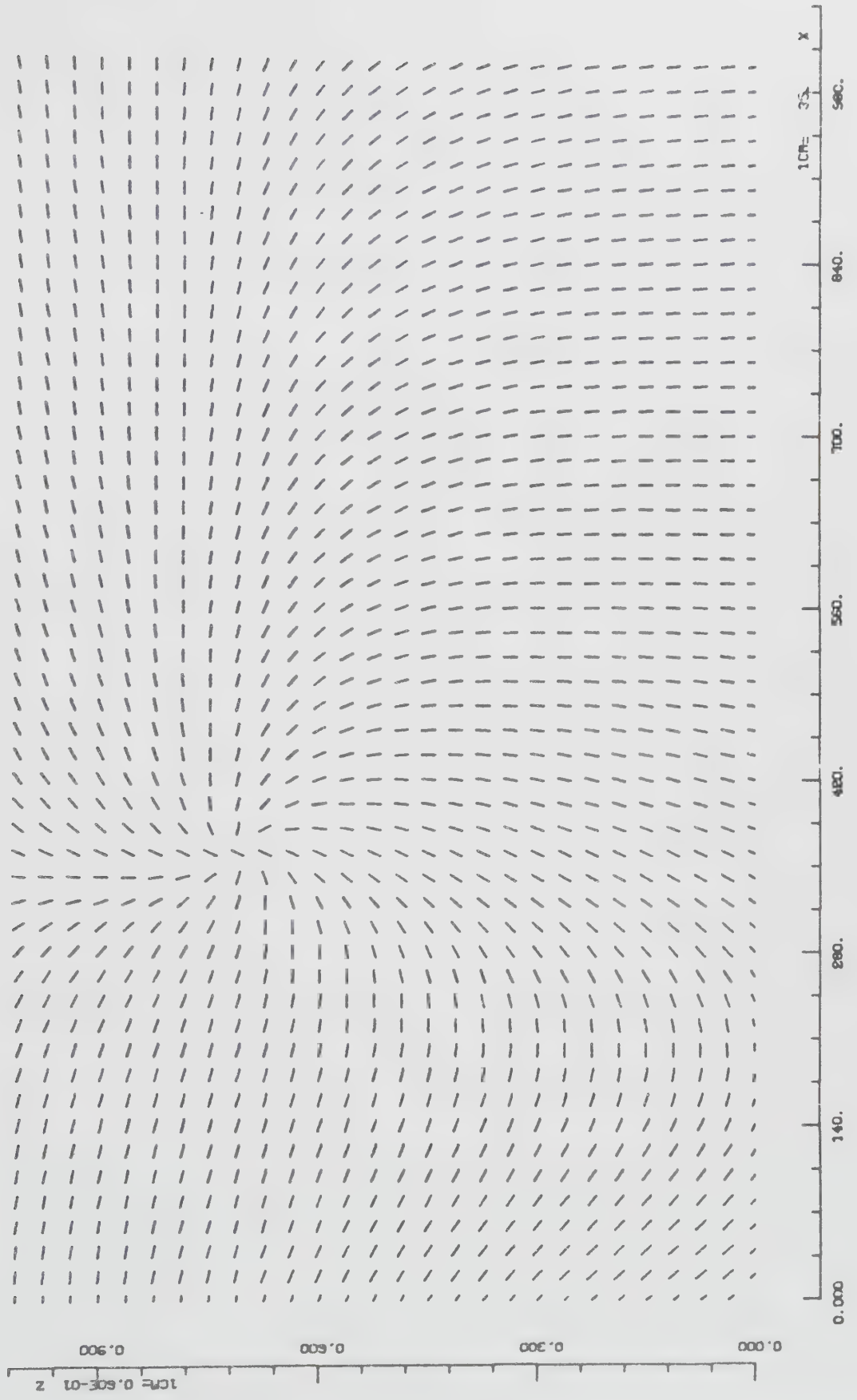


Fig. 3-16- PLAN DE PHASE. TRACE DES ISOCLINES

— Figure 3-17

Elle correspond à :

$$k = 0{,}6\ 10^{-4}\ ,\ k' = 0{,}1\ 10^{-1}\ ,\ V = 0{,}01\ ,\ S = 0{,}6\ 10^{-3}$$

Les courbes de commutation ont l'allure d'une hyperbole dont les deux branches traversent la zone de fonctionnement.

On se trouve donc en présence de quatre courbes de commutation et par suite deux zones mortes où :

$$u = \frac{dz}{dt} = 0$$

En réalité, c'est la zone supérieure qui est la plus intéressante car c'est sur elle que se réalise l'équilibre. La partie du plan comprise entre ces deux zones correspond à :

$$u = +V$$

et les autres à : $u = -V$

On constate qu'un blocage de la vanne ne se produit que pour des valeurs faibles de la température et que la convergence est toujours très amortie.

— Figure 3-18

Dans cet exemple les valeurs des paramètres sont identiques à celles du cas précédent excepté pour :

$$k' = 0{,}8\ 10^{-2}$$

L'allure de la zone morte est inversée par rapport à la figure 3-17. La partie droite du plan correspond à une commande positive, la gauche à une commande négative. La convergence est aussi très amortie.

— Figure 3-19

On a dans ce cas là : $k' = 0{,}5\ 10^{-3}$

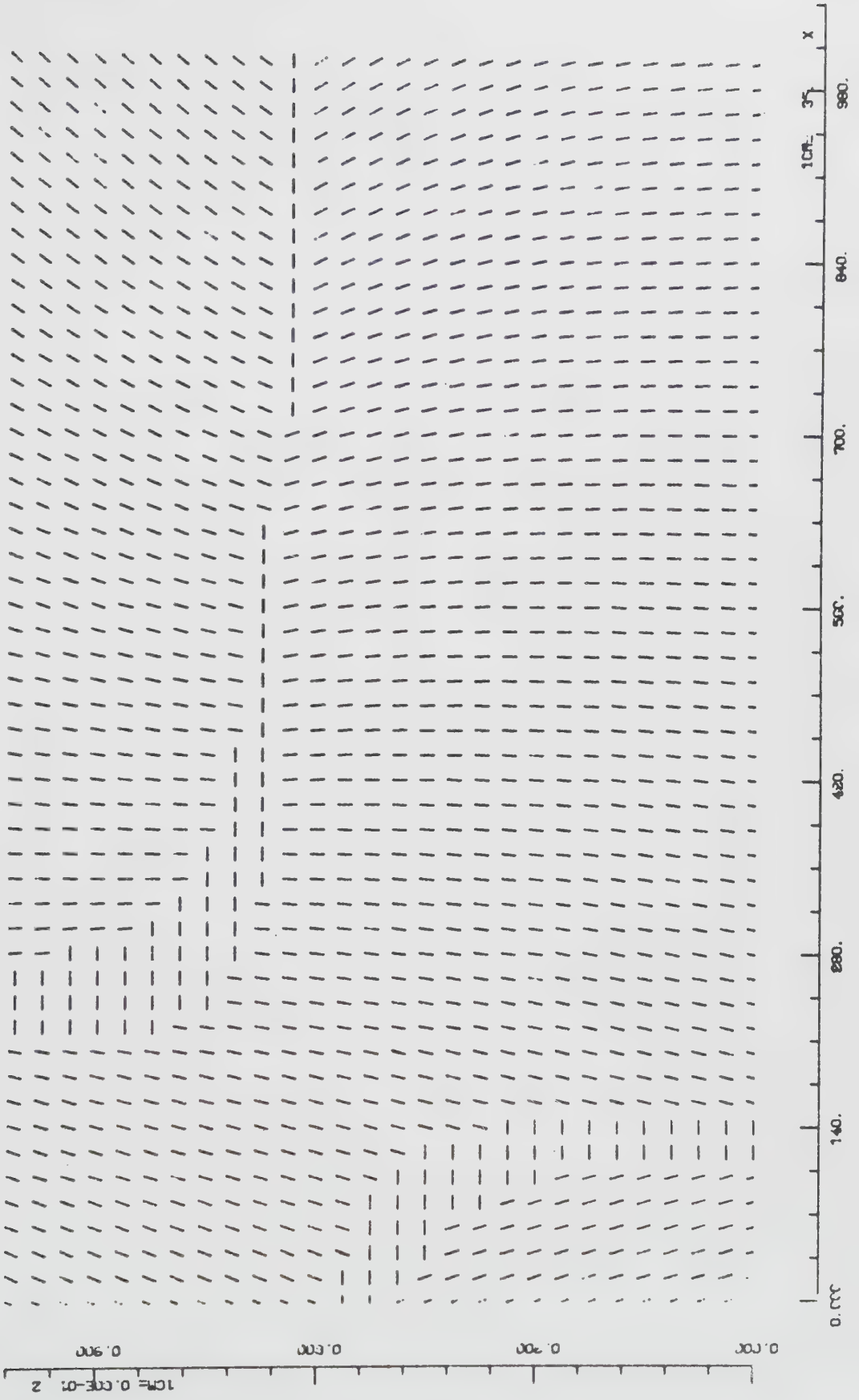


Fig. 3-17- PLAN DE PHASE. REGULATION EN TOUT OU RIEN

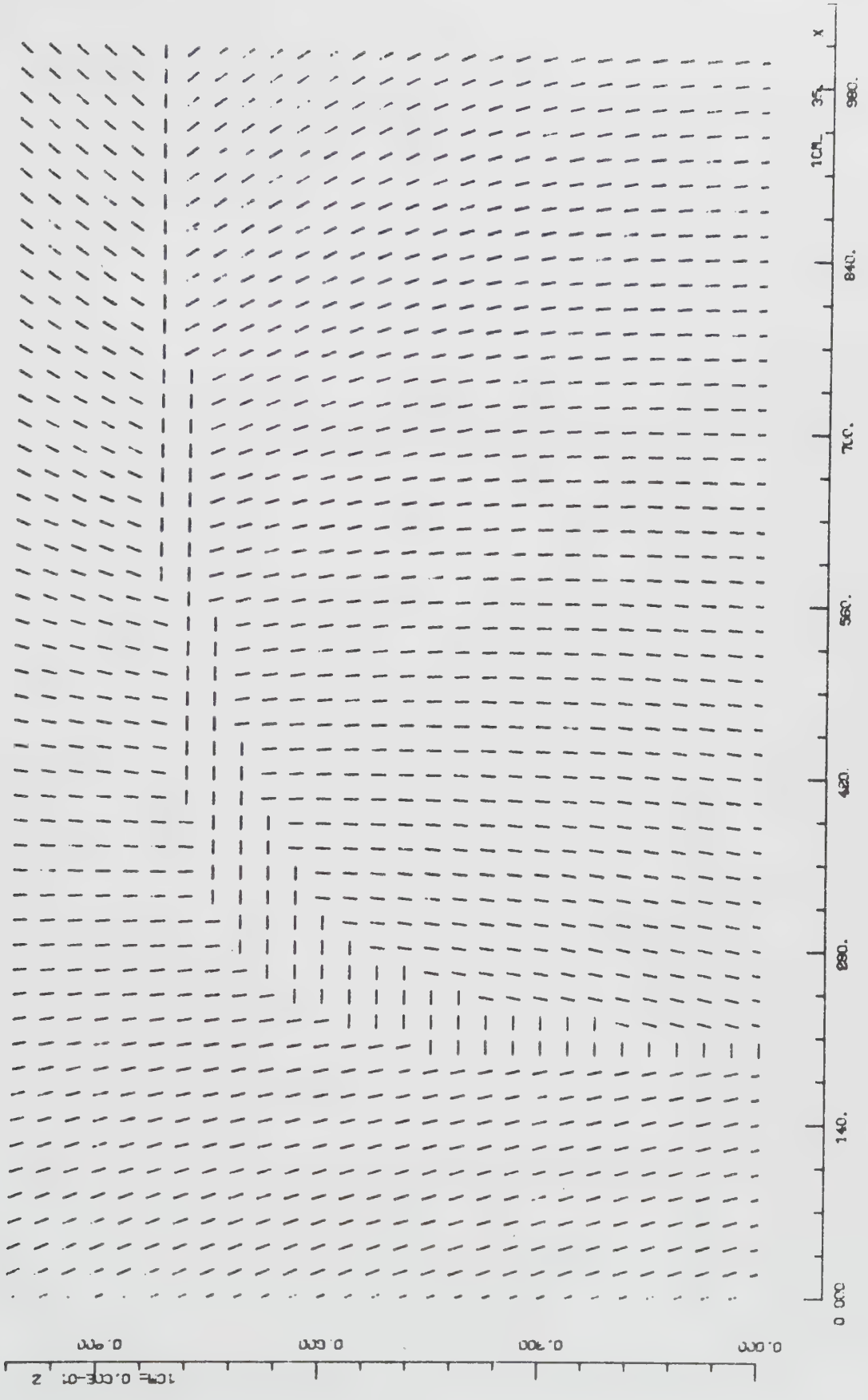


Fig. 3-18- PLAN DE PHASE. REGULATION EN TOUT OU RIEN

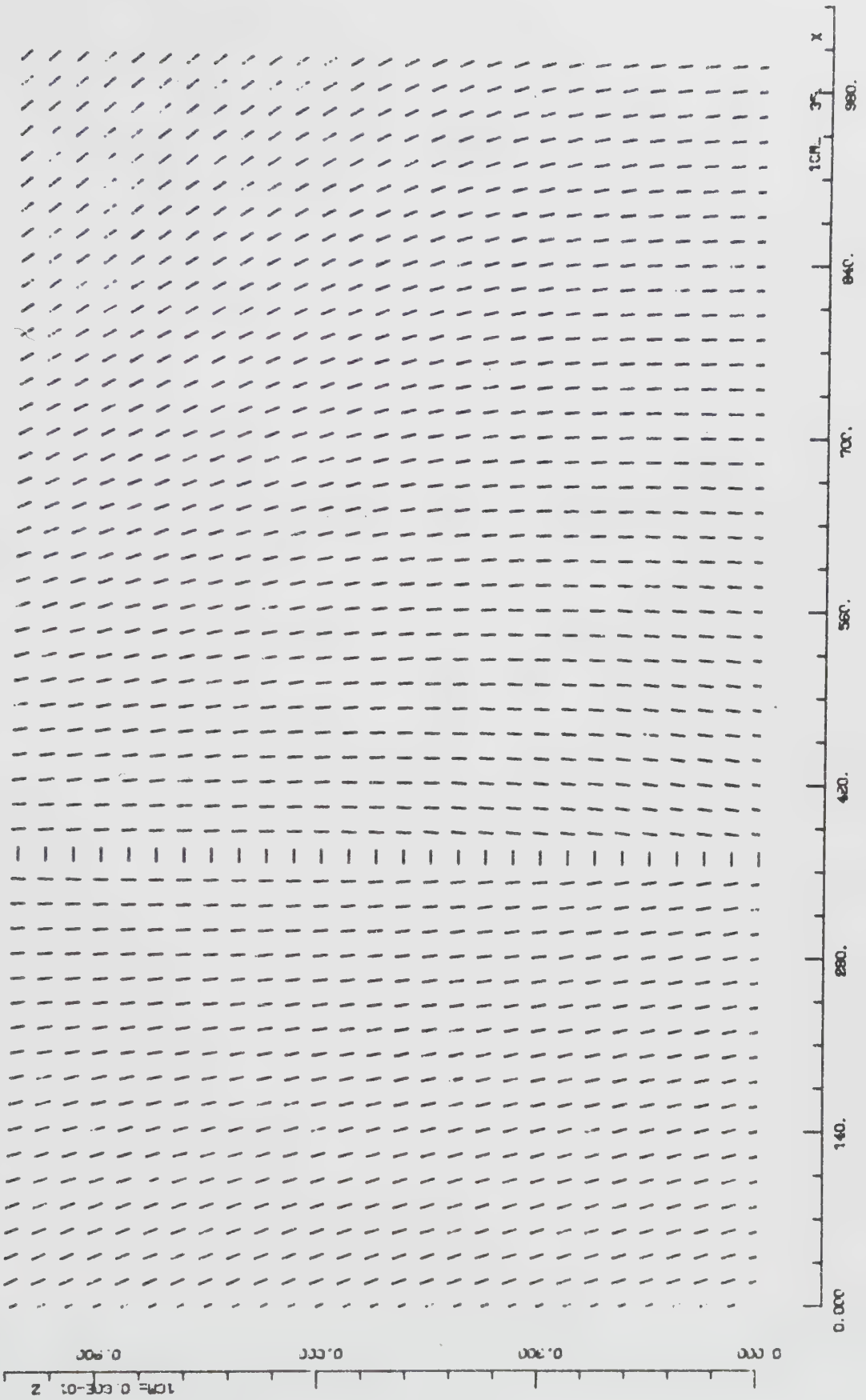


Fig. 3-19- PLAN DE PHASE. REGULATION EN TOUT OU RIEN

La zone morte est pratiquement verticale. La partie droite du plan correspond à une ouverture de la vanne, la partie gauche à une fermeture. La quasi-totalité des conditions initiales conduisent à un blocage de la vanne. La convergence est oscillatoire mais relativement assez rapide.

On constate en fait que, même pour des valeurs très élevées de la vitesse de rotation de la vanne et k' = 0, le système reste stable.

E - Vérification sur le modèle du 3° ordre

Le retour au système du 3° ordre permet de vérifier que l'allure des courbes intégrales est sensiblement la même que pour le modèle du second ordre.

Les figures 3-20 et 3-21 ont été tracées pour :

$$k = 0,6 \ 10^{-4}$$

$$k' = 0,8 \ 10^{-2}$$

$$V = 0,1 \ 10^{-1}$$

$$S = 0,6 \ 10^{-3}$$

et pour deux points de vue différents.

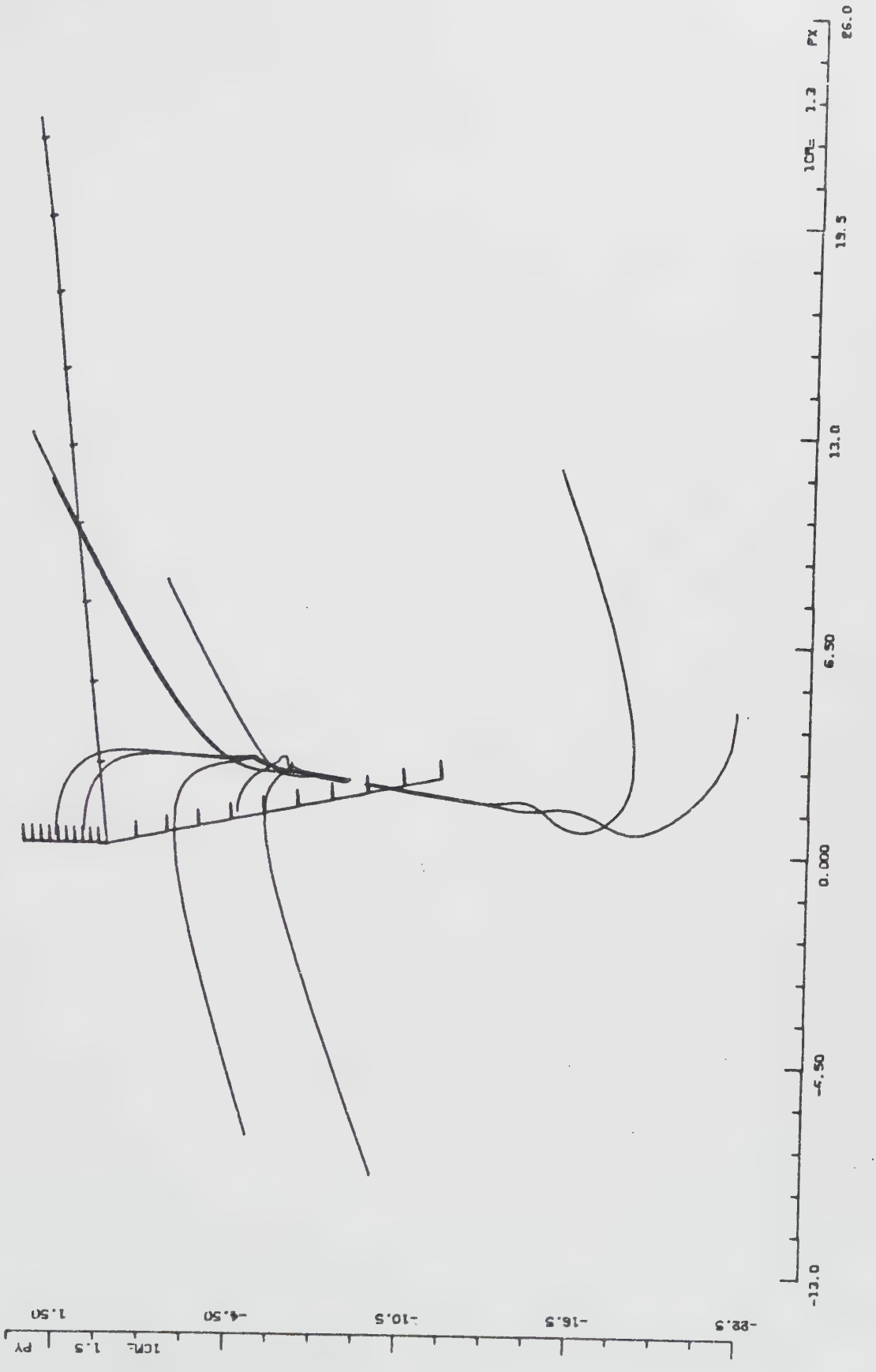


Fig. 3-20- ESPACE DE PHASE. REGULATION EN TOUT OU RIEN

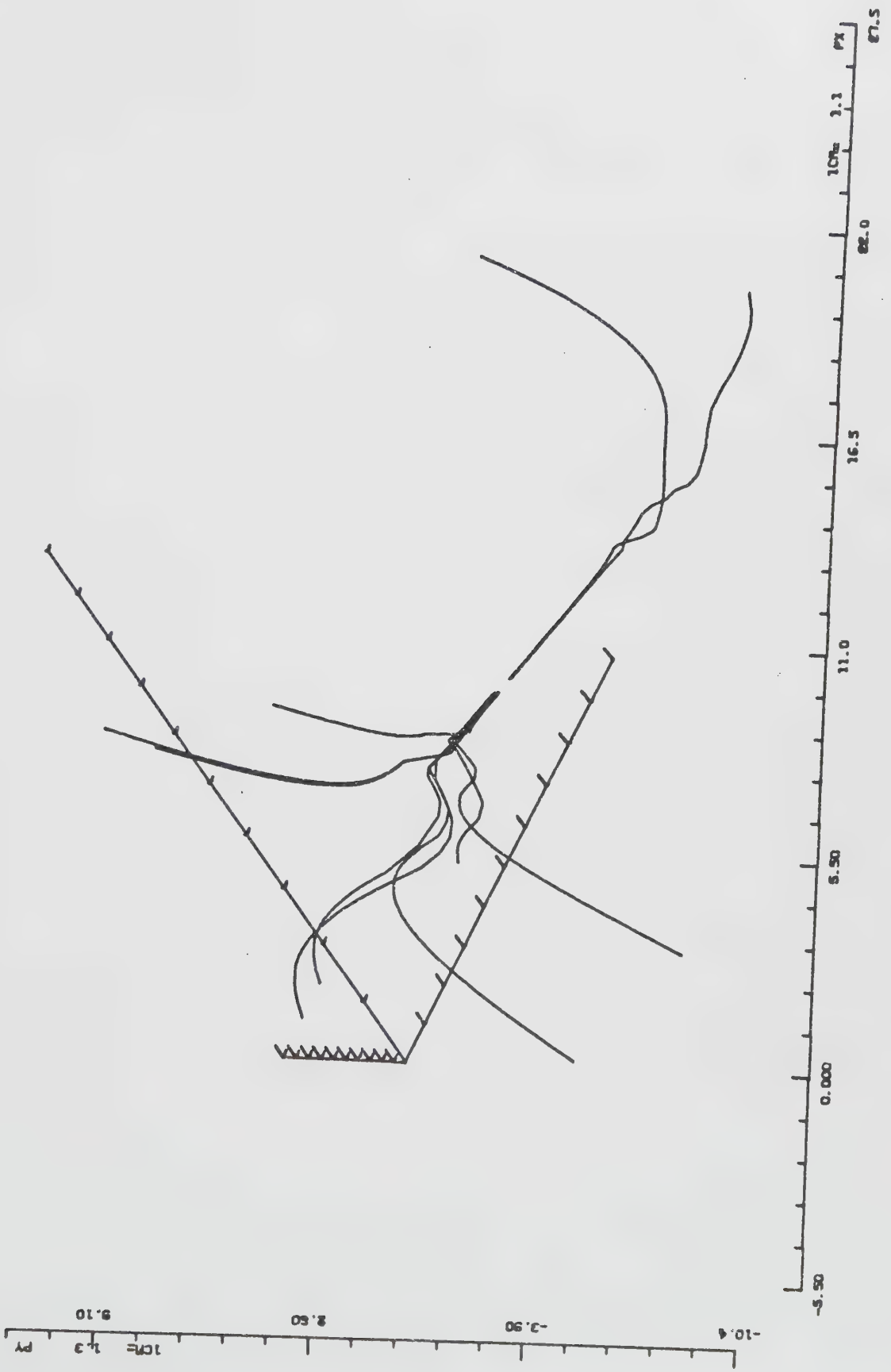


Fig. 3-21- ESPACE DE PHASE. REGULATION EN TOUT OU RIEN

3.3. - REALISATION ET RESULTATS OBTENUS

Quatre tiroirs autonomes de régulation ont été réalisés. Ces tiroirs sont amovibles et tous les postes d'irradiation sont équipés pour les recevoir.

3.3.1. Principe

La régulation, étudiée ci-dessus, est faite théoriquement à partir de la mesure des variables d'état, c'est-à-dire de la température à régler et de sa dérivée par rapport au temps. Or, étant donné les grandes constantes de temps du système à commander, la mesure directe de celle-ci serait très imprécise et fortement entachée de bruit. Il est donc nécessaire de remplacer cette mesure par une estimation aussi valable que possible.

Cette estimation est réalisée à l'aide d'un modèle analogique du premier ordre de la boucle d'irradiation. La vitesse de rotation de la vanne étant relativement très grande (0 à 100 % en 47 secondes pour les boucles EDF 3), et les perturbations se produisant au contraire en régime normal de façon lente, une variation rapide de température est essentiellement créée par une rotation de la vanne. En appliquant à l'entrée du modèle une tension proportionnelle à la vitesse de rotation, on obtient donc à la sortie une grandeur évoluant sensiblement de la même façon que la dérivée $\frac{d\theta}{dt}$. Le moteur d'entraînement étant à vitesse fixe on peut pratiquement prélever cette tension d'entrée sur deux contacts du relais qui alimente celui-ci. Il est donc possible d'avoir un gain k' aussi grand que l'on désire et le signal de sortie n'est affecté que d'un bruit très restreint.

Si l'on tient compte des perturbations, le système bouclé obtenu est, en toute rigueur, différent de celui étudié précédemment. En réalité, on a ainsi défini un circuit correcteur non linéaire. Cette procédure d'étude, à l'aide des variables d'état, permet cependant une synthèse plus globale et plus aisée que par les méthodes classiques.

La figure 3-22 représente le schéma général du tiroir de régulation et la figure 3-23 le schéma détaillé des principaux circuits.

La tension du thermocouple mesurant la température à régler est amplifiée par l'amplificateur A1 qui a la caractéristique de posséder un taux élevé de réjection de mode commun. L'amplificateur différentiel A2 fournit la tension d'erreur par rapport à une tension de consigne réglable à l'aide du potentiomètre P14 et d'un commutateur rotatif. Cette erreur est visualisée sur un galvanomètre.

L'amplificateur A5 associé à un circuit RC réglable représente le modèle de la boucle d'irradiation et reçoit, à partir de deux contacts du relais de commande une tension positive si la vanne se ferme et négative si elle s'ouvre.

Les tensions issues de A2 et A5 sont sommées dans l'amplificateur A3. Celui-ci possède un gain réglable qui, avec celui de A5, permet de fixer les valeurs de k et k'. Le signal obtenu est envoyé sur deux amplificateurs à seuil A6 et A7 qui, par l'intermédiaire de transistors de puissance commandent les relais d'ouverture ou de fermeture de la vanne.

Ces amplificateurs possèdent une hystérésis réglable afin d'éviter des commutations dues aux bruits de mesure.

3.2.2. Réalisation

La photographie ci-jointe montre l'aspect extérieur du tiroir. Sur la face avant on trouve, en partant du haut, les éléments suivants :

- le galvanomètre de visualisation de l'erreur entouré de deux lampes indiquant l'une que la vanne est en train de se fermer l'autre qu'elle est en train de s'ouvrir;
- le potentiomètre et le commutateur rotatif permettant l'affichage de la température de consigne;
- un commutateur de fonctions.

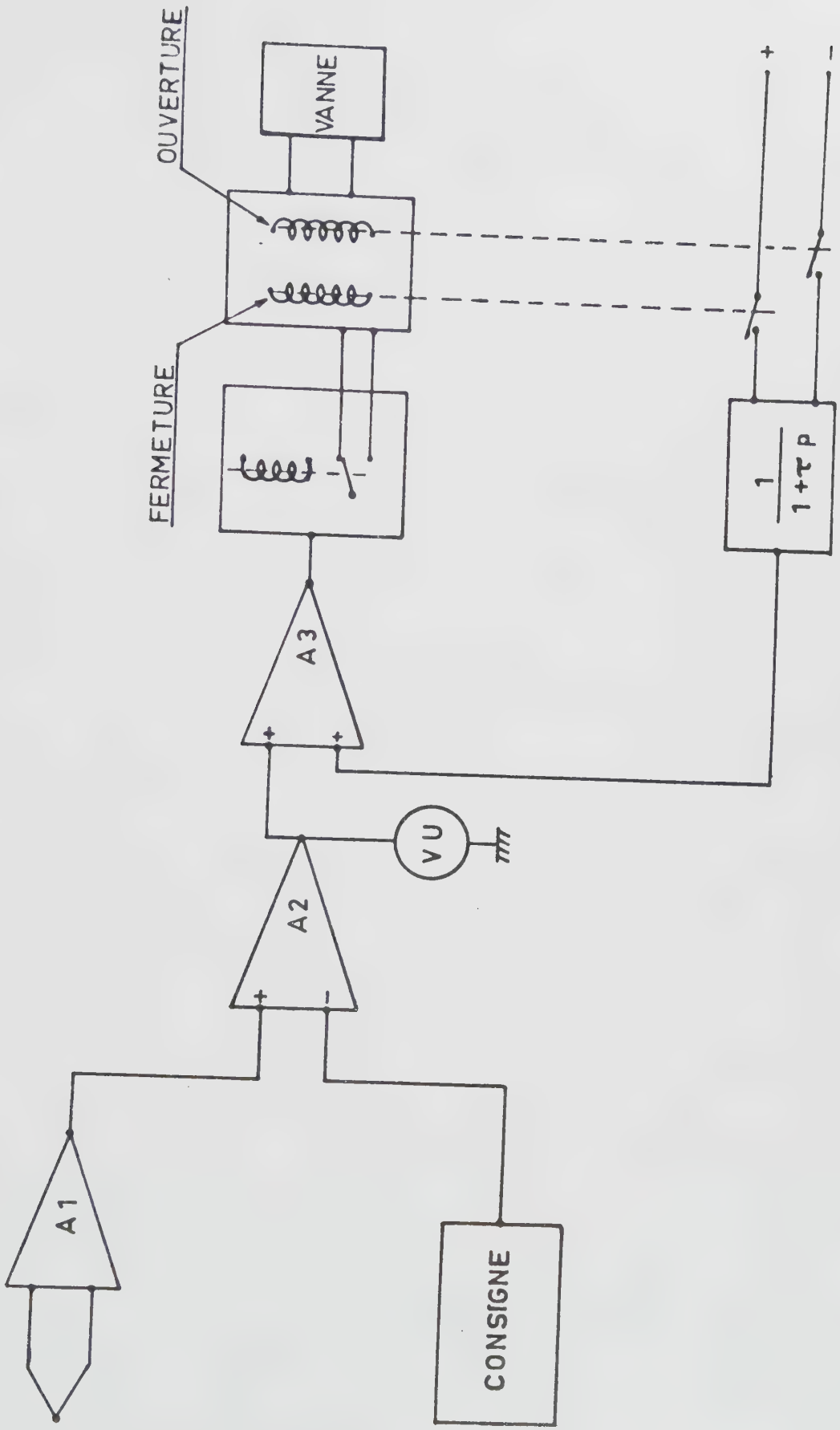


Fig. 3-22- TIROIR DE REGULATION. SCHEMA SYNOPTIQUE

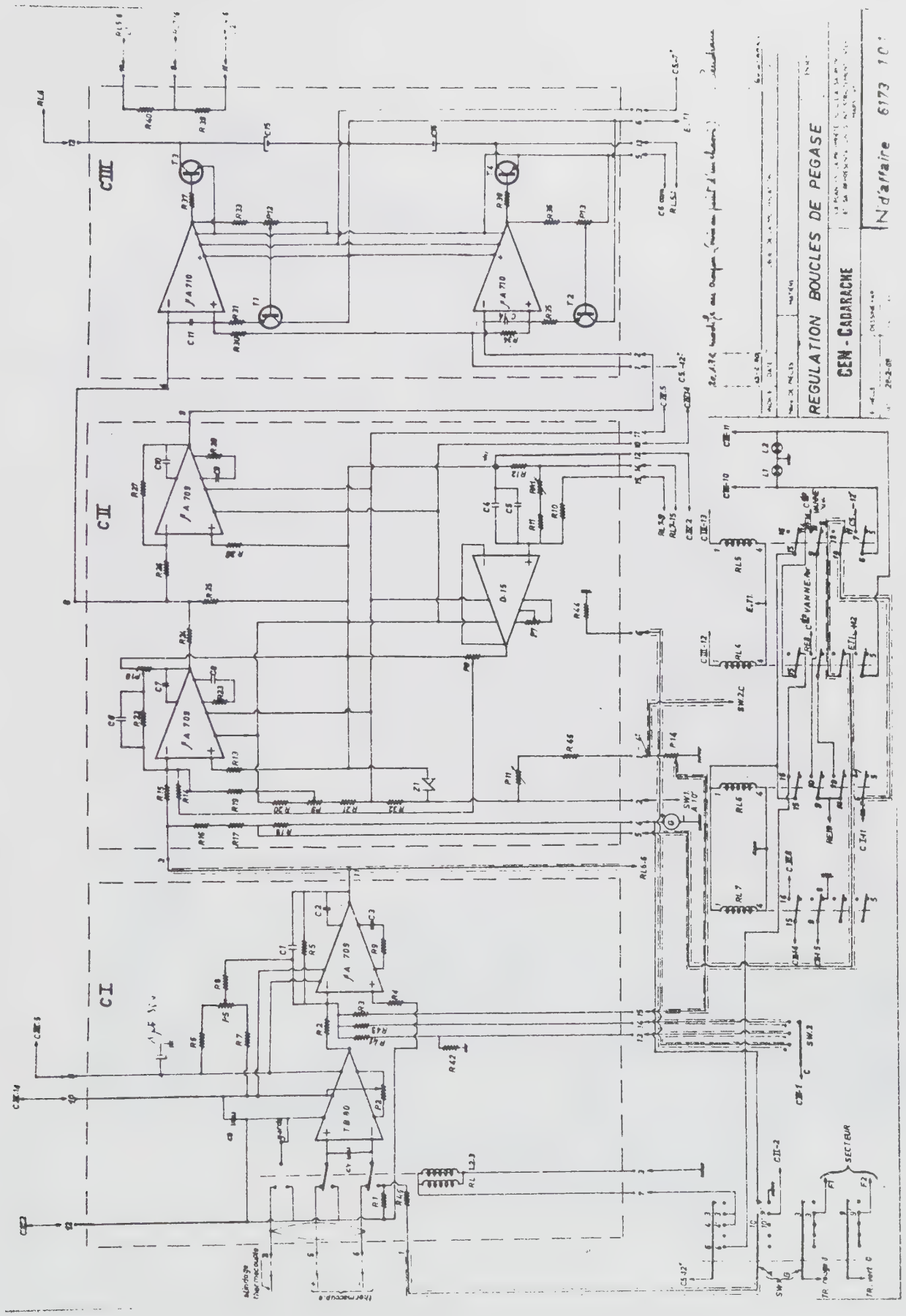
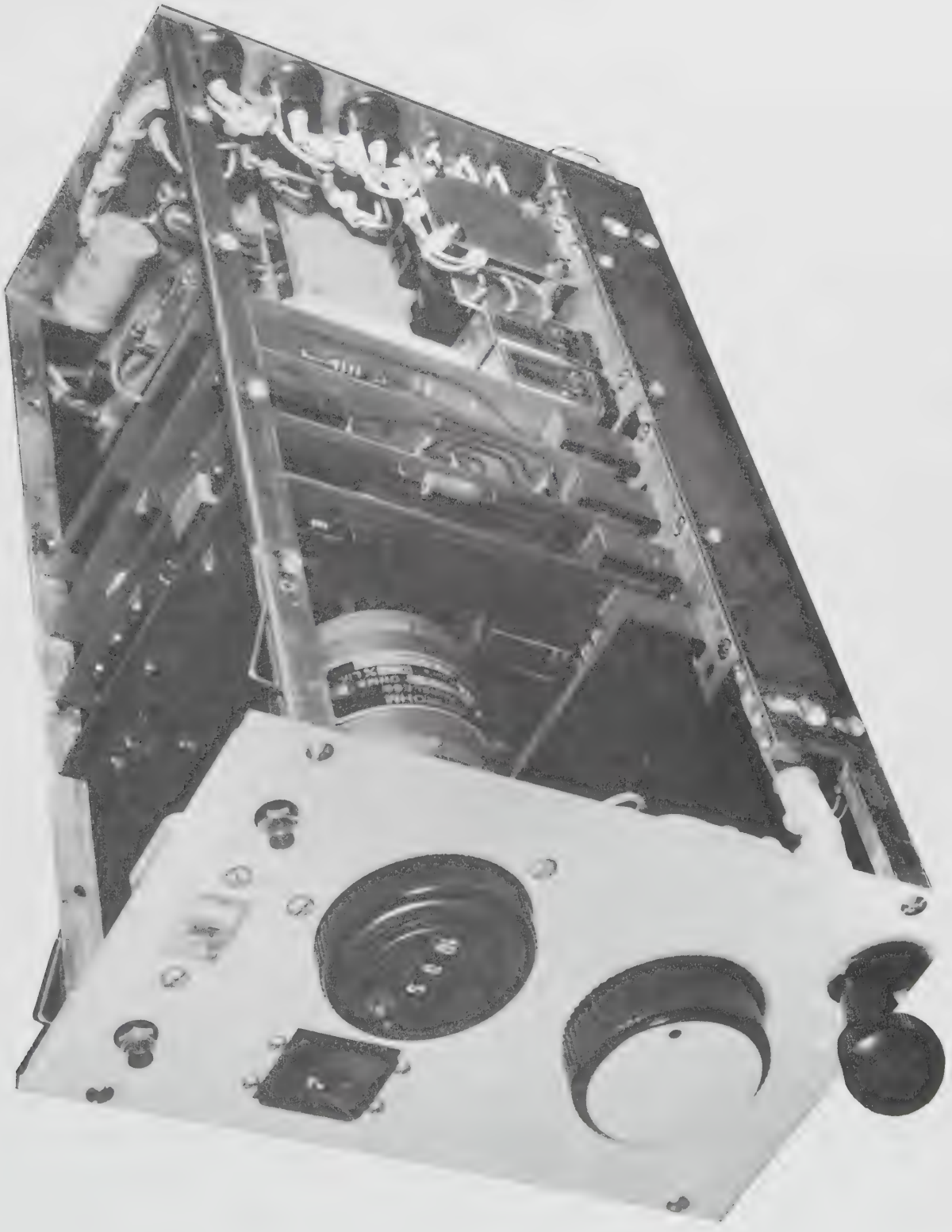


Fig. 3-23- TIROIR DE REGULATION. SCHEMA DETAILLE



Ce commutateur comporte cinq positions dont les deux principales permettent de mettre le tiroir en fonctionnement soit "manuel" soit "automatique".

En fonctionnement manuel, le tiroir mesure la température de l'élément combustible et affiche la tension d'erreur sur le galvanomètre mais ne commande pas la rotation de la vanne. Un circuit séquentiel interdit le passage en automatique tant que la valeur absolue de l'erreur est supérieure à une valeur fixée. L'opérateur doit donc actionner manuellement la vanne de façon à amener la température de l'élément au voisinage de la consigne. Si le commutateur était en position "automatique", une fois cette condition remplie, le tiroir passe de lui-même en fonctionnement réellement automatique. Dans le même temps l'échelle du galvanomètre est dilatée afin d'avoir une précision plus grande d'affichage de la tension d'erreur. Le système reste alors en automatique tant qu'on n'actionne pas le commutateur pour revenir en manuel.

3.3.3. Résultats

La précision obtenue dépend essentiellement des caractéristiques de la boucle contrôlée et en particulier des organes de commande de la vanne et du comportement de celle-ci. En moyenne, il est possible de se fixer un seuil de $\pm$ 3°C tout en conservant une fréquence des commutations compatible avec les impératifs de sécurité de l'installation.

La figure 3-24 est la reproduction d'un enregistrement réel réalisé sur une boucle INCA. Les deux perturbations que l'on peut observer sont dues respectivement l'une à une action manuelle sur la position de la vanne, l'autre à une modification de la température de consigne. On constate que dans les deux cas la température se stabilise rapidement.

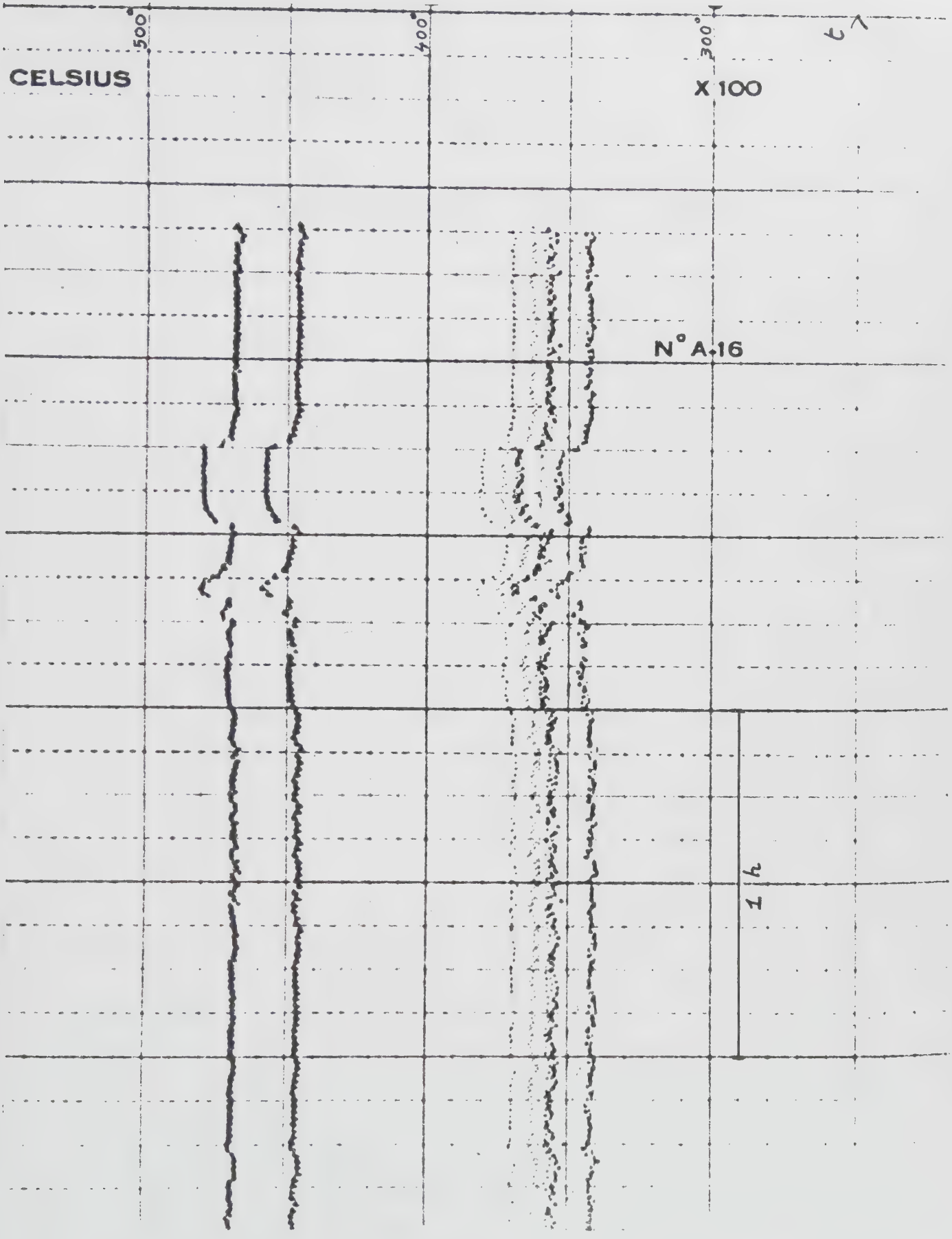


Fig. 3-24- REGULATION. ENREGISTREMENT REEL

4 - CONCEPTION GENERALE DE L'UNITE DE COMMANDE

4.1. - PROBLEMES POSES

La principale mission de l'unité de commande est de réaliser automatiquement des cyclages sur les barreaux de combustible irradiés. Pratiquement on n'effectue un cyclage que sur une seule boucle à la fois. En effet, nous avons vu au chapitre 2 que le déplacement d'une boucle au fond de la piscine modifiait sensiblement la répartition spatiale du flux neutronique. Deux cyclages simultanés risqueraient donc d'interagir entre eux.

Pour la même raison, sans même tenir compte des autres perturbations possibles, il est nécessaire de maintenir fixe la température des autres boucles d'irradiation. Ce problème de régulation a été résolu, pour les boucles classiques, par la réalisation des tiroirs de régulation autonomes. Par contre pour les nouveaux types de boucles (HTR), qui comportent un circuit secondaire de refroidissement, cette régulation devra être effectuée par l'unité de commande.

En réalité, d'autres expériences dynamiques sont prévues (cyclages de puissance en maintenant la température constante, cyclages de température par action sur la vitesse de la soufflante etc...) mais elles peuvent toutes se ramener à l'une ou l'autre des précédentes.

L'apport immédiat d'un pilotage automatique des boucles serait d'améliorer considérablement la précision des expériences, mais ce n'est pas le seul critère à observer. En effet, dans une telle installation, la sécurité de fonctionnement et la fiabilité revêtent une importance capitale. Une boucle d'irradiation est un ensemble complexe qui mesure environ cinq mètres de hauteur et contient un matériau nu-

cléaire. On conçoit que son déplacement dans l'eau de la piscine ne doit pas se faire sans ménagements. Il est donc nécessaire de rechercher le meilleur compromis possible entre une précision maximale et une vitesse de déplacement de boucle minimale. C'est un problème d'optimalisation.

Nous avons vu d'autre part que, pour chaque nouvelle centrale nucléaire en étude, on construit un type nouveau de boucle. De plus, on expérimente sur chaque boucle des éléments combustibles de nature ou de configuration différentes. Si l'on ajoute à cela l'action des perturbations diverses, on conçoit que les paramètres de l'ensemble peuvent varier dans des proportions très importantes d'un cas à un autre. Comme on ne peut pas imposer à l'utilisateur de corriger, à chaque fois, les réglages du système de commande, il faudra que celui-ci puisse les modifier automatiquement en fonction de la nature du système à commander. Il devra être auto-adaptatif.

4.2. - DEFINITION D'UN MODELE MATHEMATIQUE

Lorsqu'on aborde un problème de commande optimale on se trouve généralement placé devant le dilemme suivant :

- si l'on adopte un modèle mathématique complexe du système à commander, il devient souvent difficile d'arriver à une solution exploitable pratiquement;
- si, par contre, on cherche à définir un modèle mathématique très simplifié, on court le risque de restreindre sa validité à un petit domaine de fonctionnement.

L'emploi des récentes techniques d'auto-apprentissage semble permettre d'aborder avec succès une large classe de problèmes, même dans le cas où il est impossible de définir un modèle mathématique. Elles ont cependant l'inconvénient d'utiliser, le plus souvent, une méthode de recherche pas à pas dont la convergence est longue ou difficile à assurer. De plus, de par sa nature même, un système autodidactique est obligé de commettre des erreurs pour pouvoir les cor-

riger ensuite. Or, dans le cas présent, il est indispensable que le fonctionnement soit correct dès le début de l'expérience, c'est-à-dire dès le premier cycle. Une étude, réalisée par H. OTTAVI [14] du CNRS de Marseille, a permis d'illustrer l'intérêt et les limites d'une telle procédure.

Les méthodes d'auto-adaptation ou d'estimation des paramètres [5] [15] [11], si elles nécessitent une connaissance a priori de la structure du système, ont par contre l'avantage d'agir beaucoup plus rapidement. De plus on constate, dans la majorité des cas, que le système à commander a un fonctionnement simple dans un domaine relativement grand. Il est donc possible, et il semble intéressant, d'adopter la procédure suivante : définir un modèle mathématique assez simple pour permettre de résoudre le problème de commande optimale et modifier, par une estimation automatique et permanente, les paramètres de ce modèle afin qu'il soit toujours représentatif du système réel.

Il est certain que si le domaine de validité du modèle, à un instant donné, est plus petit que celui couvert en fonctionnement normal, on n'obtiendra qu'une trajectoire quasi optimale. Il y a donc un compromis à réaliser entre la simplicité de la commande optimale et le degré de perfection désiré.

C'est la méthode que nous avons adoptée ici, d'autant plus que, comme nous l'avons vu plus haut, le système de pilotage automatique des boucles d'irradiation doit être, en tout état de cause, auto-adaptatif.

4.3. - REALISATION

Etant donné la complexité des calculs relatifs à la commande optimale et à l'estimation des paramètres, et la nécessité de définir un système qui puisse facilement évoluer par la suite, on est conduit, par des considérations d'ordre aussi bien technique qu'économique, à concevoir un système de commande comprenant un calculateur "temps réel" en ligne. Celui-ci peut prendre facilement en compte certaines tâches

relatives à la sécurité de fonctionnement de l'ensemble : surveillance de certaines températures, détection rapide de chutes de barres etc... De plus, étant donné la possibilité de travailler en temps partagé, le calculateur peut effectuer plusieurs opérations simultanément (ou plus exactement en entrelacement), en particulier un cyclage et plusieurs régulations. En l'absence de cyclage, le calculateur peut même assurer certaines fonctions secondaires : relevé général de températures à un instant donné, exécution de programmes de calcul etc...

L'ensemble du système doit répondre à des critères analogues :

- il doit avoir un caractère très évolutif;
- il doit posséder une haute fiabilité et une grande facilité de maintenance.

Ces critères ont conduit, pour la partie électronique classique, à l'adoption du standard CAMAC. Le principal avantage de ce standard, du moins dans le cas présent, est de constituer un ensemble homogène organisé pour fonctionner avec un ordinateur en ligne. Il est composé d'un ou plusieurs châssis contenant un certain nombre de tiroirs. Chacun de ces tiroirs possède une adresse et peut donc être appelé séparément par le calculateur qui lui fournit, en particulier, le type de fonction à réaliser (lecture, écriture, incrémentation etc...). Le tiroir peut, lui-même, adresser un signal d'interruption au calculateur.

Il est donc très facile d'étendre la capacité de l'ensemble par adjonction de nouveaux tiroirs et modification du programme si celle-ci n'était pas prévue initialement. De plus, ces tiroirs étant, évidemment, standards, leur maintenance peut se faire par simple échange, donc de façon très rapide.

5 - ETUDE THEORIQUE DE L'UNITE DE COMMANDE

Cette étude est divisée en trois parties :

— la commande optimale des cyclages,

— la régulation,

— l'estimation des paramètres.

En régime normal et avec une configuration maximale, l'unité de commande devra assurer :

— un cyclage sur une boucle d'irradiation;

— une régulation en température sur les sept autres boucles.

Il est bien évident que c'est le cyclage qui va poser les plus grands problèmes notamment en ce qui concerne la sécurité. C'est-à-dire qu'il faut que l'unité de commande "surveille" pratiquement en permanence l'expérience dynamique en cours. Etant donné les grandes constantes de temps du système, on peut considérer que ce pilotage se fait en continu, bien qu'en réalité on soit en présence d'un système échantillonné. Par contre, en ce qui concerne la régulation, une boucle donnée ne sera commandée qu'à des intervalles de temps relativement longs. Dans ce dernier cas il est donc nécessaire de tenir compte de l'influence de l'échantillonnage.

5.1. - COMMANDE OPTIMALE DES CYCLAGES

5.1.1. Définition d'une "consigne anticipative"

Les méthodes classiques de résolution des problèmes de commande optimale, pour les systèmes linéaires, permettent d'obtenir directement la structure du système bouclé optimal avec des gains de boucle dépendant du temps. On introduit alors, a posteriori, les signaux de consigne en les traitant comme des perturbations, c'est-à-dire en remplaçant les variables d'état par les signaux d'erreur. On obtient alors la structure de la figure 5-1.

Or, on perd ici une information importante. En effet, on ne profite pas du fait que, sauf dans quelques cas particuliers, on connaît parfaitement à l'avance l'évolution de ces consignes. Il est donc permis de se demander s'il n'existe pas un vecteur Z(t), introduit à la place du vecteur de consigne X(t) susceptible de donner de meilleurs résultats quant à la minimalisation de la fonction de coût adoptée. On aurait alors le schéma de la figure 5-2.

Soit un système du n° ordre linéaire et uniformément contrôlable [22]. SILVERMAN a montré [21] que, dans ces conditions, ce système pouvait toujours être représenté par l'équation vectorielle d'état :

$$\dot{x}(t) = A(t)\, x(t) + b(t)\, u(t) \qquad x(t_o) = x_o \tag{5-1}$$

où $x(t)$ est le vecteur d'état à n dimensions $u(t)$ est une fonction scalaire de commande et $A(t)$ et $b(t)$ des matrices d'ordre n x n et n x 1 telles que :

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots\cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots\cdots & 0 \\ \multicolumn{5}{c}{\text{----------}} \\ \multicolumn{5}{c}{\text{----------}} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots\cdots & 1 \\ -a_1(t) & -a_2(t) & a_3(t) & \cdots\cdots & -a_n(t) \end{bmatrix} \tag{5-2}$$

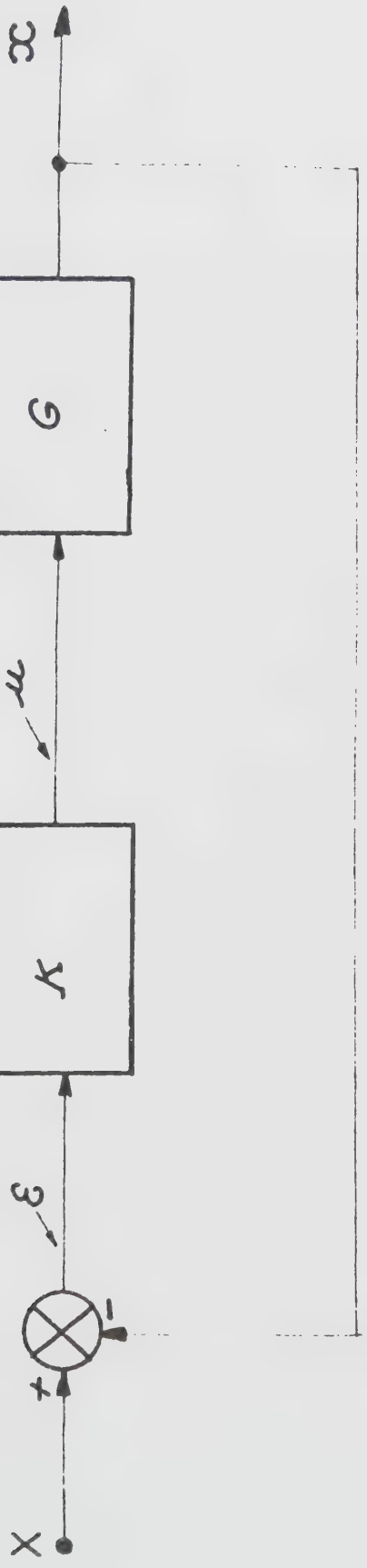


Fig. 5-1- STRUCTURE D'UN SYSTEME BOUCLE OPTIMAL CLASSIQUE

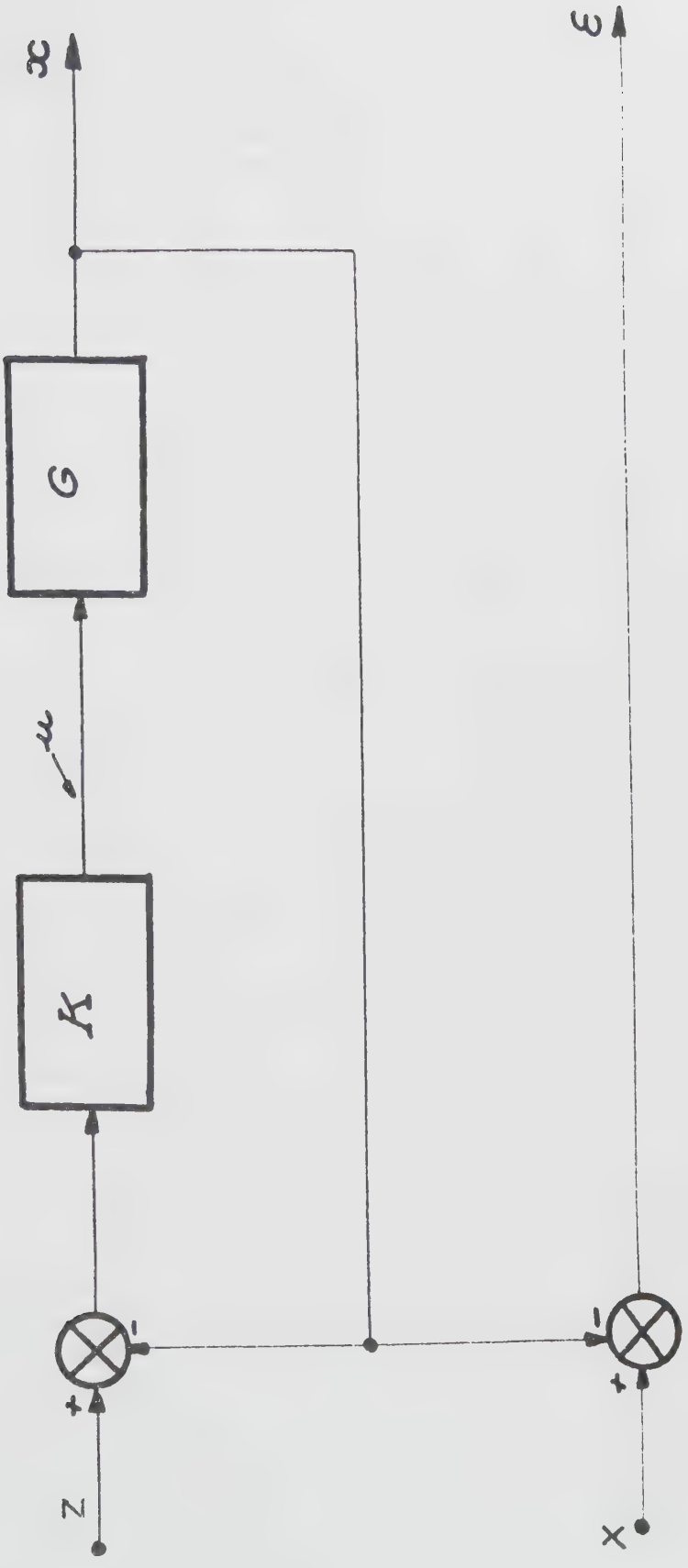


Fig. 5-2- STRUCTURE D'UN SYSTEME BOUCLE OPTIMAL AVEC CONSIGNE ANTICIPATIVE

et

$$b(t) = b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}3)$$

Soit la fonction de coût à minimaliser :

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_o}^{T} \left[\left(x(t) - X(t)\right)' \, Q(t) \, \left(x(t) - X(t)\right) + u^2(t) \right] dt \qquad (5\text{-}4)$$

où Q(t) est une matrice carrée symétrique d'ordre n définie positive et X(t) le vecteur de consigne d'ordre n. Le symbole ' indique l'opération de transposition.

L'emploi des équations de PONTRYAGIN [16] permet de déterminer l'action optimale u(t) qui rend minimale la fonction de coût I. On définit la fonction hamiltonienne suivante :

$$H = \frac{1}{2} \left[\left(x(t) - X(t)\right)' \, Q(t) \, \left(x(t) - X(t)\right) + u^2(t) \right] + p'(t) \, \dot{x}(t) \qquad (5\text{-}5)$$

où p(t) est le vecteur gradient par rapport à x de $\min_u I$

C'est-à-dire :

$$H = \frac{1}{2} \left[x'Q\,x + X'Q\,X - 2\,X'Q\,x + u^2 \right] + p' \left[Ax + bu \right] \qquad (5\text{-}6)$$

en sous-entendant que tous les termes, excepté b, sont fonction du temps. PONTRYAGIN a montré que le système est optimal si H est minimalisé par rapport à u, soit :

$$\frac{\delta H}{\delta u} = \bar{u} + b'p = 0 \qquad (5\text{-}7)$$

c'est-à-dire :

$$\bar{u} = - b'p \qquad (5\text{-}8)$$

On a alors la forme habituelle de l'hamiltonien ne contenant que p et x :

$$\overline{H} = \frac{1}{2}\left[x'Q\,x + X'Q\,X - 2\,X'Q\,x - p'b\,b'p\right] + p'A\,x \qquad (5\text{-}9)$$

On peut alors établir les équations de PONTRYAGIN suivantes :

$$\overset{\circ}{x} = \frac{\delta H}{\delta p} = Ax - bb'p \qquad (5\text{-}10)$$

$$\overset{\circ}{p} = -\frac{\delta H}{\delta x} = QX - Qx - A'p \qquad (5\text{-}11)$$

La structure de la figure 5-2 amène à poser, compte tenu de (5-8) :

$$p = -Y + Kx \qquad (5\text{-}12)$$

où K est une matrice carrée d'ordre n symétrique et Y = KZ.

Soit :

$$\overset{\circ}{p} = -\overset{\circ}{Y} + \overset{\circ}{K}x + K\overset{\circ}{x} \qquad (5\text{-}13)$$

En portant ces expressions dans (5-10) et (5-11) on obtient :

$$-\overset{\circ}{Y} + \overset{\circ}{K}x + KAx + Kbb'Y - Kbb'Kx = QX - Qx + A'Y - A'Kx \qquad (5\text{-}14)$$

Pour que cette égalité soit vérifiée quel que soit le vecteur x, il faut que :

$$\overset{\circ}{K} + KA + A'K - Kbb'K + Q = 0 \qquad (5\text{-}15)$$

et

$$\overset{\circ}{Y} + A'Y - Kbb'Y + QX = 0 \qquad (5\text{-}16)$$

soient vérifiées.

La condition [16] :

$$p(T) = 0 \qquad (5\text{-}17)$$

entraîne :

$$K(T) = 0 \qquad (5\text{-}18)$$

$$Y(T) = 0 \qquad (5\text{-}19)$$

On vérifie que (5-15) est l'équation matricielle de RICATTI classique [10] et que sa résolution ne dépend pas de celle de (5-16), ni du vecteur de consigne X. Il faut donc résoudre d'abord l'équation (5-15) [17] puis, une fois la matrice K(t) obtenue, résoudre l'équation différentielle linéaire (5-16).

Un cas particulier important est celui où A et Q ne dépendent pas du temps et où $T = \infty$. KALMANN a montré que le vecteur K devient invariant, c'est-à-dire que :

$$KA + A'K - Kbb'K + Q = 0 \qquad (5\text{-}20)$$

On obtient alors une structure bouclée à gains constants donnés par la matrice $\overline{K}$ vérifiant (5-20). On peut montrer, de la même façon, que, si X est invariant, l'équation (5-16) se réduit à :

$$A'Y - \overline{K}bb'Y + QX = 0 \qquad (5\text{-}21)$$

Ce qui donne la matrice $\overline{Y}$.

Cette matrice peut être considérée comme la position d'équilibre résultant de l'intégration du système (5-16) en temps négatif à partir de $T = \infty$ avec les conditions initiales (5-19). Donc, toujours en raisonnant en temps négatif, l'équation (5-21) ne restera valable que tant que X sera invariant. Soit, en temps réel, T_f l'instant où le signal X devient invariant. Pour $t \geqslant T_f$ l'équation (5-21) s'applique, donc :

$$Y(t) = \overline{Y} \quad , \quad t \geqslant T_f \qquad (5\text{-}22)$$

Posons :

$$\theta = T_f - t \qquad (5\text{-}23)$$

Pour $t < T_f$, $Y(\theta)$ sera solution du système :

$$\overset{\circ}{Y}(\theta) = A'Y(\theta) - \overline{K}bb'Y(\theta) + QX(\theta) \qquad (5\text{-}24)$$

$$Y(0) = \overline{Y} \qquad (5\text{-}25)$$

L'examen de l'équation (5-24) montre qu'en temps négatif $Y(\theta)$ "continuera" à évoluer "après" la "fin" du signal $X(\theta)$, c'est-à-dire que le vecteur Y(t) commencera à évoluer avant le début de l'évolution du vecteur de consigne X(t). C'est pourquoi nous appellerons Y(t) vecteur de "consigne anticipative".

5.1.2. Détermination de la loi de commande optimale

Lors d'un cyclage, la position de la vanne de refroidissement reste fixe. L'équation (2-21), représentant le fonctionnement d'une boucle d'irradiation devient donc une équation du second ordre à coefficients constants. L'étude d'enregistrements réels montre que celle-ci peut s'approximer par une équation du premier ordre dans le domaine de fonctionnement correspondant à un cyclage moyen. Compte tenu du fait que l'unité de commande procèdera à une estimation permanente des paramètres, il est possible de conserver cette approximation sur toute la plage de fonctionnement.

Nous avons vu, au chapitre 2, que la puissance W débitée dans le barreau de combustible est proportionnelle à la variable φ dépendant de la distance x séparant la boucle du coeur par la relation :

$$\varphi = e^{-0,0165\ x} \qquad (5\text{-}26)$$

En réalité, au voisinage du point de fonctionnement moyen, la portion d'exponentielle correspondante peut facilement être assimilée à une droite. La boucle sur laquelle est effectué un cyclage est déplacée grâce à un ensemble mobile, comportant un moteur à vitesse variable, qui se branche sur la commande manuelle. La vitesse de rotation du moteur est réglable par un potentiomètre. Celui-ci sera actionné par un moteur pas à pas recevant des impulsions à partir de l'unité de commande, et peut être assimilé à un bloqueur.

Pour la clarté de l'exposé, il est donc préférable de prendre comme variable de commande la dérivée par rapport au temps de la puissance W débitée dans le barreau, celle-ci étant reliée linéairement à la position du moteur pas à pas.

Finalement en mettant le système d'équations sous la forme (5-2), on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u - ax_2 \end{aligned} \qquad (5\text{-}27)$$

où :

x_1 est la température maximale de l'élément combustible

u représente à un coefficient constant près la dérivée par rapport au temps de la puissance W

a est un paramètre dépendant du type de boucle et des conditions de fonctionnement.

Soit X le vecteur de consigne avec :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{5-28}$$

où : X_1 et X_2 sont les consignes sur la température et sa dérivée.

On a donc :

$$\dot{X}_1 = X_2 \tag{5-29}$$

Les paliers de température ont une durée assez longue vis-à-vis des constantes de temps d'une boucle pour permettre de considérer les rampes séparément les unes des autres. Ce point n'est nullement restrictif mais permet également de clarifier l'exposé.

Le critère de commande choisi est le suivant :

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_o}^{\infty} \left[\mu^2 (x_1 - X_1)^2 + \lambda (x_2 - X_2)^2 + u^2 \right] dt \tag{5-30}$$

où μ et λ sont des coefficients constants. Le système se met donc directement sous les formes (5-1) et (5-4) avec :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \qquad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad Q = \begin{bmatrix} \mu^2 & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \tag{5-31}$$

Soit :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} \tag{5-32}$$

et :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \\ y_2 \end{bmatrix} \tag{5-33}$$

Les équations (5-8) et (5-12) donnent :

$$\bar{u} = y_2 - k_{12}\, x_1 - k_{22}\, x_2 \tag{5-34}$$

La résolution analytique du système (5-20), associée au critère de ROUTH-HURWITZ entraîne :

$$\begin{aligned} k_{12} &= \mu \\ k_{22} &= -a + \sqrt{a^2 + 2\mu + \lambda} \\ k_{11} &= \mu \sqrt{a^2 + 2\mu + \lambda} \end{aligned} \tag{5-35}$$

On obtiendrait alors en traitant le vecteur de consigne X(t) comme une perturbation, le circuit de la figure 5-3.

Prenons, par exemple, comme consigne une rampe ascendante (voir fig. 5-4), l'origine des temps étant prise à la fin de la rampe descendante précédente. Soit α le gradient de température désiré. Pour $t > T_f$ l'équation (5-21) s'applique avec, par définition :

$$X_2 = 0 \quad , \quad t > T_f \tag{5-36}$$

c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} \bar{y}_2 &= \mu\, X_{1f} \\ \bar{y}_1 &= \mu\, X_{1f} \sqrt{a^2 + 2\mu + \lambda} \end{aligned} \tag{5-37}$$

On vérifie que l'on retrouve bien le circuit de la figure 5-3.
Si on pose $\theta = T_f - t$, l'équation (5-16) donne le système :

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(\theta) &= -k_{12}\, y_2(\theta) + \mu^2\, X_1(\theta) \\ \dot{y}_2(\theta) &= y_1(\theta) - a\, y_2(\theta) - k_{22}\, y_2(\theta) + \lambda\, X_2(\theta) \end{aligned} \tag{5-38}$$

avec :

$$\begin{aligned} y_1(0) &= \bar{y}_1 \\ y_2(0) &= \bar{y}_2 \end{aligned} \tag{5-39}$$

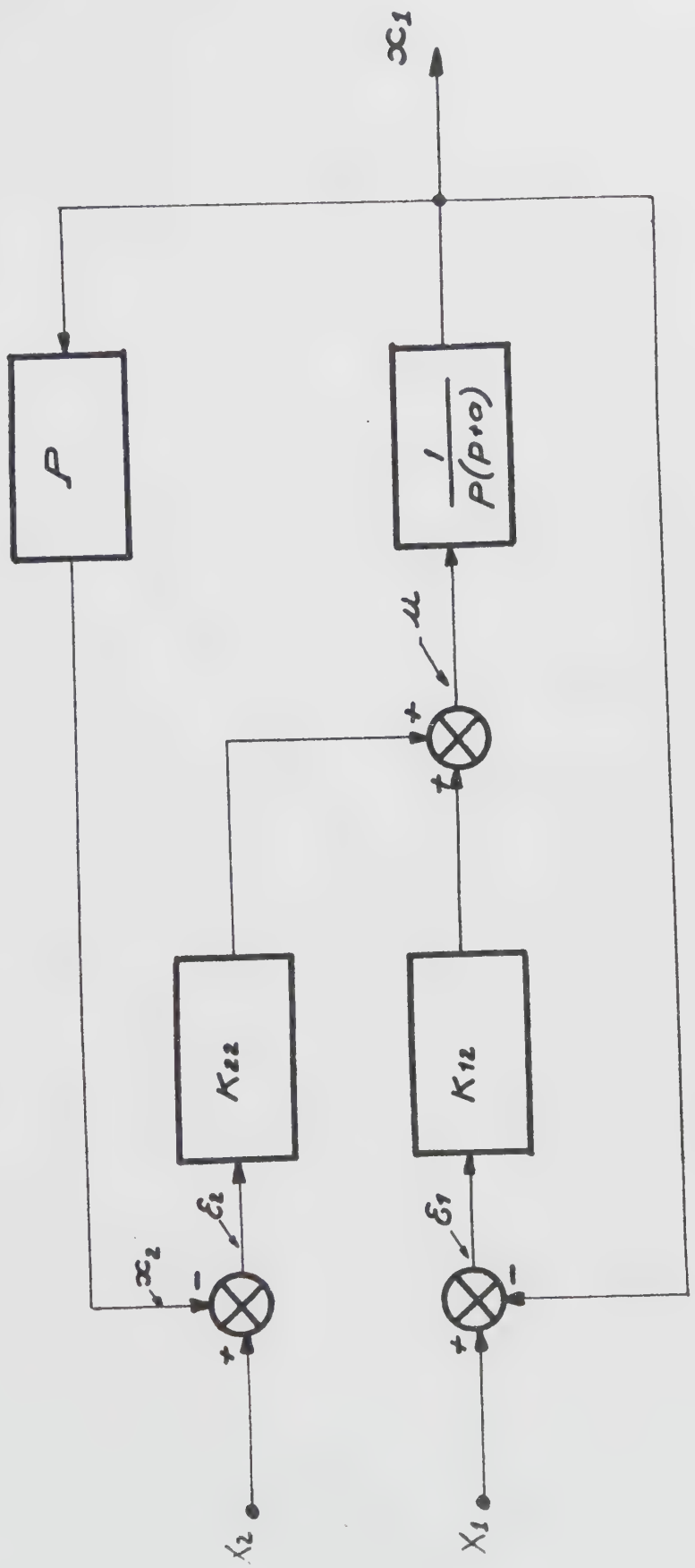


Fig. 5-3- CIRCUIT OPTIMAL DE COMMANDE DES CYCLAGES

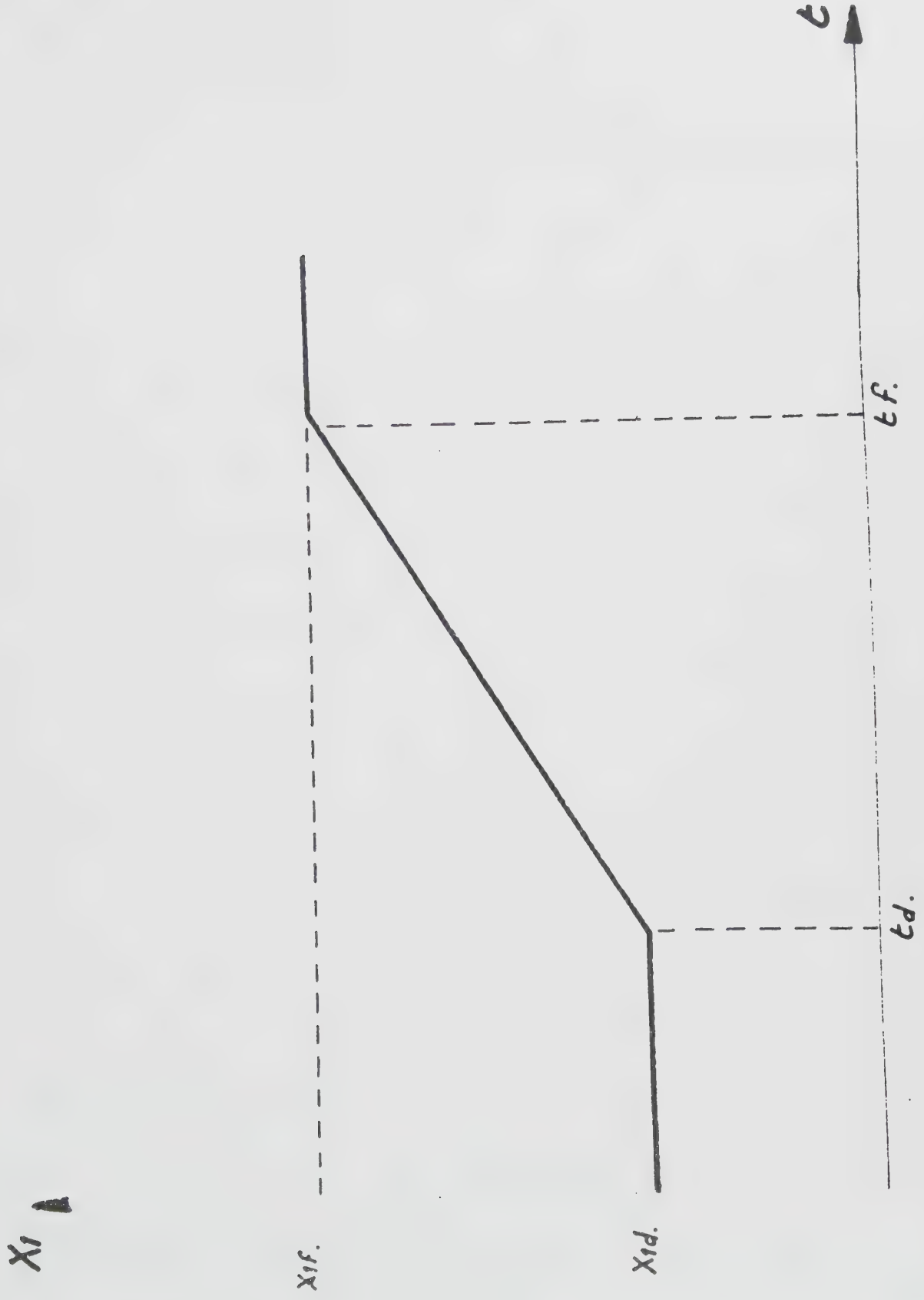


Fig. 5-4- CONSIGNE DE TEMPERATURE POUR UNE RAMPE ASCENDANTE

Tous calculs faits, on trouve :

$$y_2(\theta) = \mu\, X_1(\theta) + \alpha \left[A_1 \left(1 - e^{-p_1 \theta}\right) + A_2 \left(1 - e^{-p_2 \theta}\right) \right] \gamma(\theta) \ldots$$

$$\ldots - \alpha \left[A_1 \left(1 - e^{-p_1 (\theta - \theta_1)}\right) + A_2 \left(1 - e^{-p_2 (\theta - \theta_2)}\right) \right] \gamma(\theta - \theta_1) \qquad (5\text{-}40)$$

avec :

$$p_1 = \frac{1}{2} [\beta + \eta]$$

$$p_2 = \frac{1}{2} [\beta - \eta]$$

$$\beta = \sqrt{a^2 + 2\mu + \lambda}$$

$$\eta = \sqrt{a^2 - 2\mu + \lambda}$$

$$A_1 = \frac{\mu \beta - p_1 (\mu + \lambda)}{\eta\, p_1}$$

$$A_2 = \frac{\mu \beta - p_2 (\mu + \lambda)}{-\eta\, p_2}$$

$$\theta_1 = T_f - T_d$$

γ représentant l'échelon unité. Soit :

$$y_2(t) = \mu\, X_1(t) - \alpha \left[A_1 \left(1 - e^{-p_1 (t - T_f)}\right) + A_2 \left(1 - e^{-p_2 (t - T_f)}\right) \right] \left[\gamma(t) - \gamma(t - T_f) \right] \ldots$$

$$\ldots + \alpha \left[A_1 \left(1 - e^{-p_1 (t - T_d)}\right) + A_2 \left(1 - e^{-p_2 (t - T_d)}\right) \right] \left[\gamma(t) - \gamma(t - T_d) \right] \qquad (5\text{-}41)$$

On a donc enfin :

$$\overline{u}(t) = y_2(t) - \mu\, x_1(t) - (\beta - a)\, x_2(t) \qquad (5\text{-}42)$$

Le coefficient d'amortissement Z du système bouclé vérifie la relation :

$$4\, Z^2 = \frac{a^2 + 2\mu + \lambda}{\mu} \qquad (5\text{-}43)$$

On constate qu'il ne peut être inférieur à la valeur limite :

$$Z = \frac{\sqrt{2}}{2} \qquad (5\text{-}44)$$

qui est atteint lorsque μ est très grand par rapport à a^2 et λ.

5.1.3. Résultats

Une série de simulations sur ordinateur IBM 360 nous a permis de comparer les performances respectives des systèmes de commande avec et sans consigne anticipative. Nous avons pris comme valeurs numérique :

$$a = 3.10^{-2} \quad s^{-1}$$

$$\alpha = 0,15 \quad °C/s$$

$$T_d = 600 \quad s$$

$$T_f = 1800 \quad s$$

$$X_{1f} = 380 \quad °C$$

Une rampe fait donc passer la température de l'élément combustible de 200°C à 380°C en 20 minutes. Les figures 5-5a à 5-9a montrent respectivement l'évolution de la température x_1, du gradient de température x_2, de la commande u, de l'erreur sur la température ε_1 et de l'erreur sur le gradient ε_2 pour un système bouclé classique avec :

$$\mu = 5\ 10^{-4}$$

$$\lambda = 1\ 10^{-4}$$

Les erreurs sont définies de la façon suivante :

$$\varepsilon_1 = X_1 - x_1$$

$$\varepsilon_2 = X_2 - x_2$$

Les figures 5-5b à 5-9b montrent l'évolution des mêmes variables, dans les mêmes conditions, pour un système utilisant une consigne anticipative.

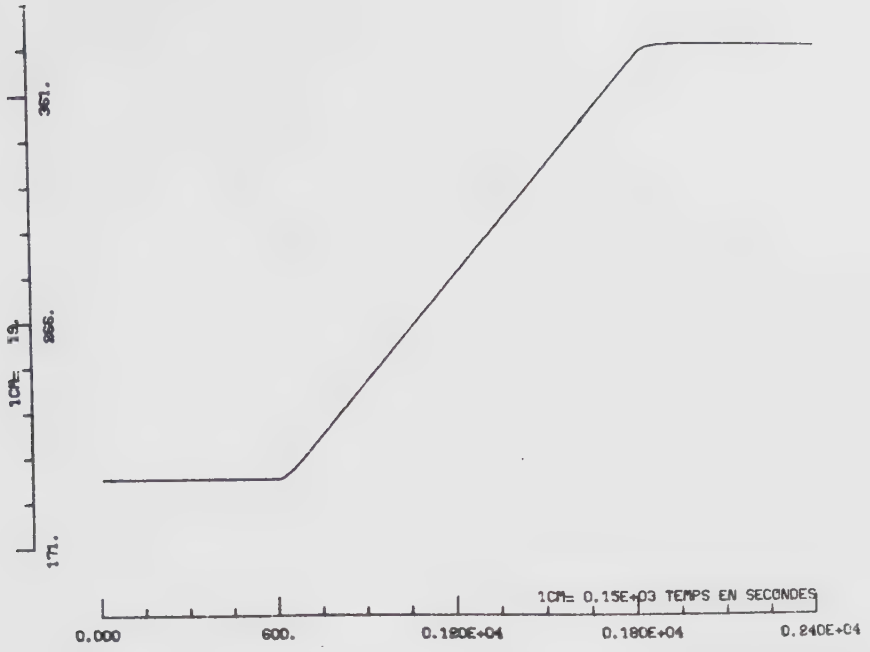


Fig. 5-5-a- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE

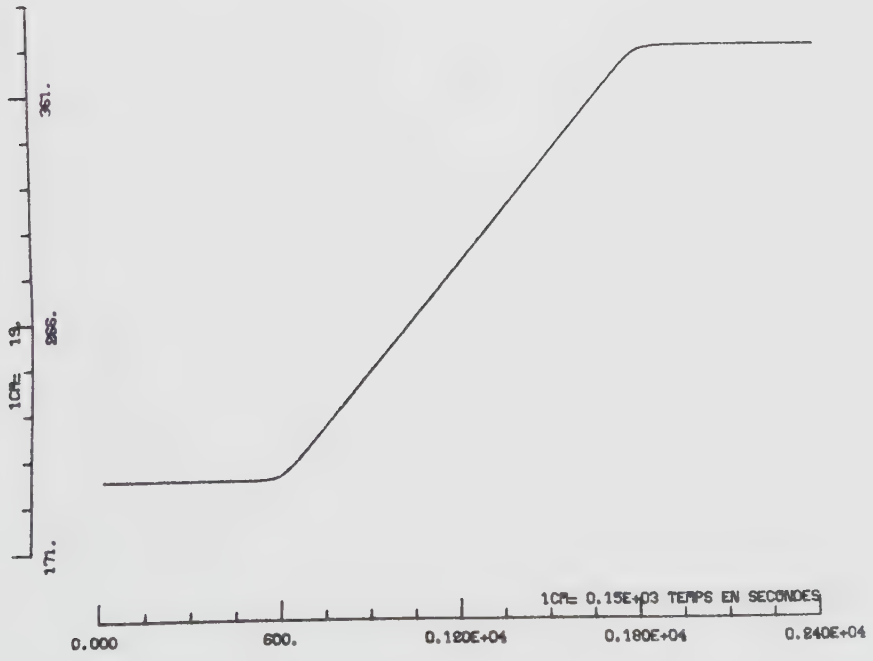


Fig. 5-5-b- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE

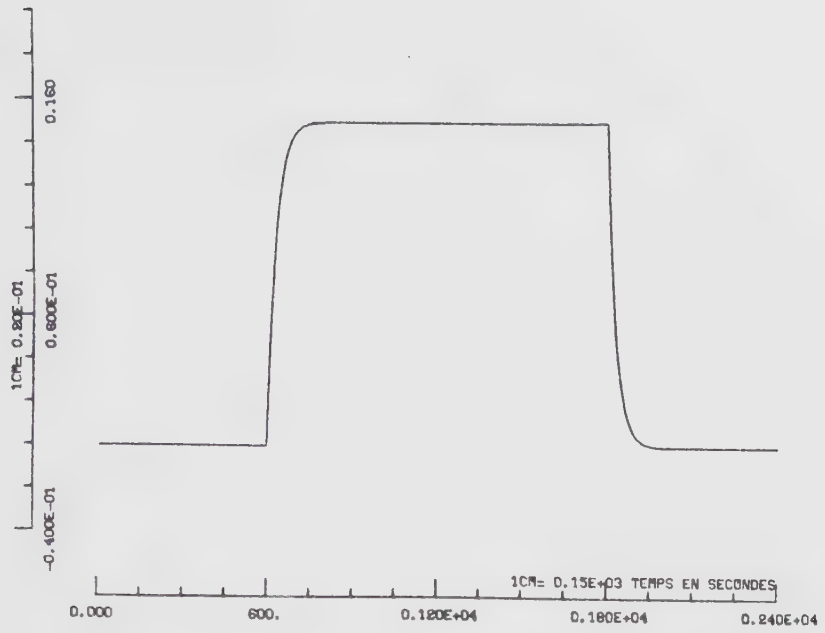


Fig. 5-6-a- EVOLUTION DE LA DERIVEE DE TEMPERATURE

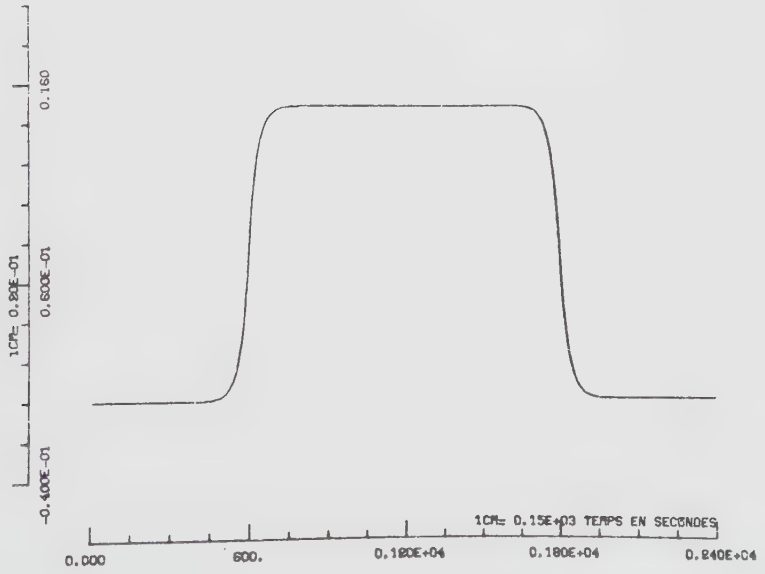


Fig. 5-6-b- EVOLUTION DE LA DERIVEE DE TEMPERATURE

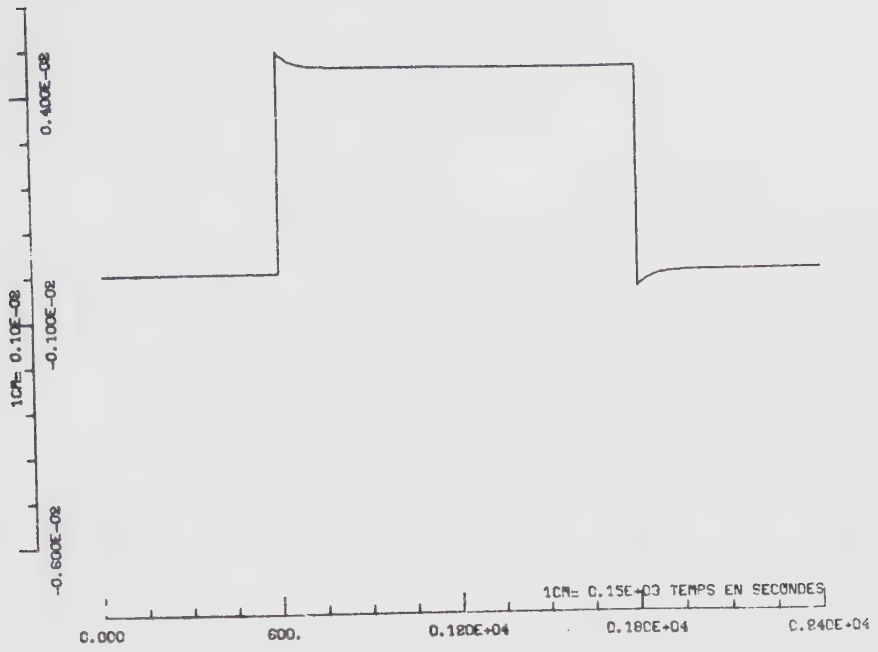


Fig. 5-7-a- EVOLUTION DU SIGNAL DE COMMANDE

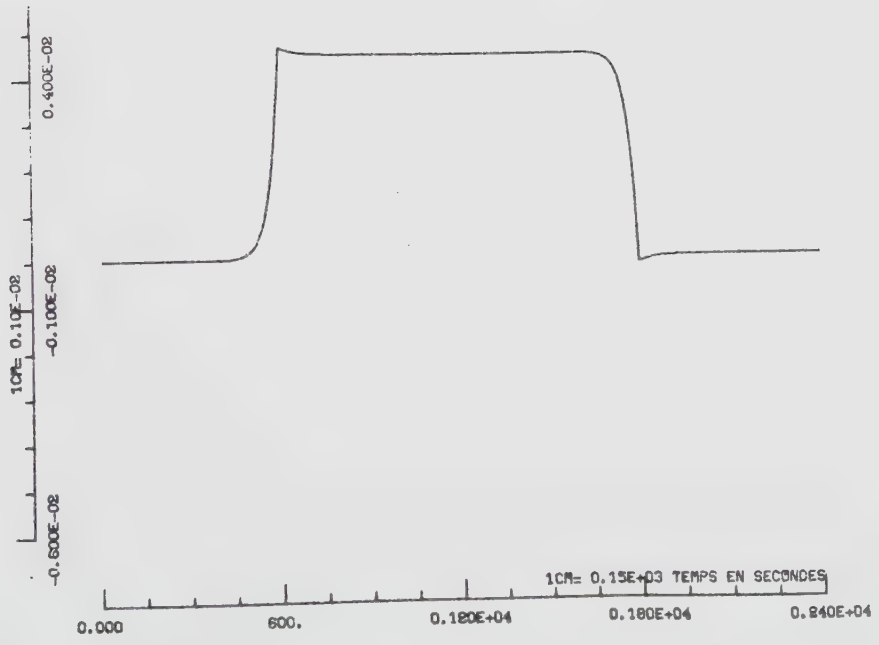


Fig. 5-7-b- EVOLUTION DU SIGNAL DE COMMANDE

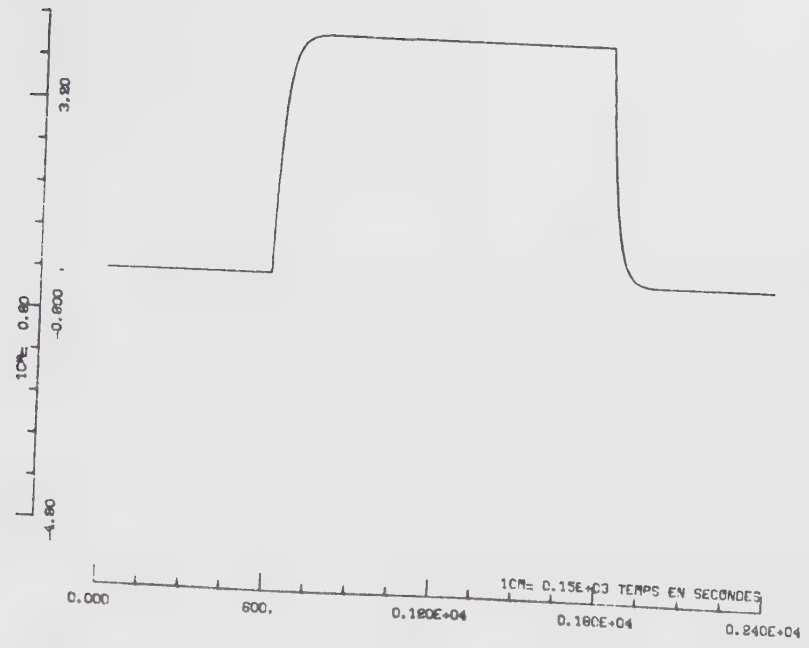


Fig. 5-8-a- EVOLUTION DE L'ERREUR EN TEMPERATURE

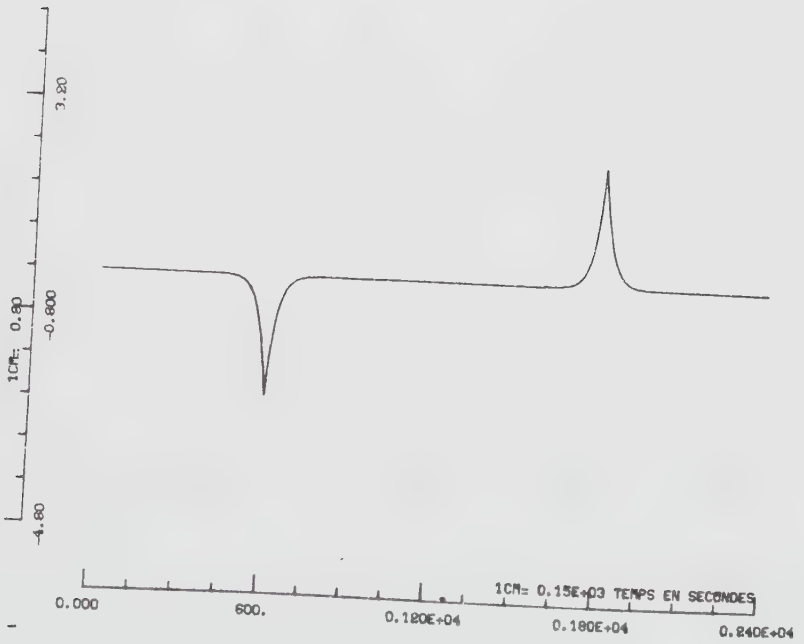


Fig. 5-8-b- EVOLUTION DE L'ERREUR EN TEMPERATURE

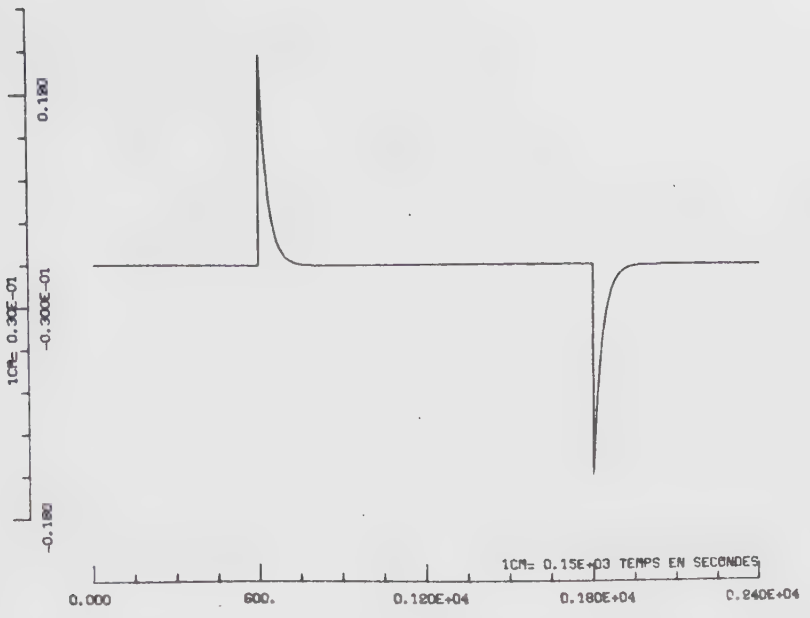


Fig. 5-9-a- EVOLUTION DE L'ERREUR SUR LA DERIVEE DE TEMPERATURE

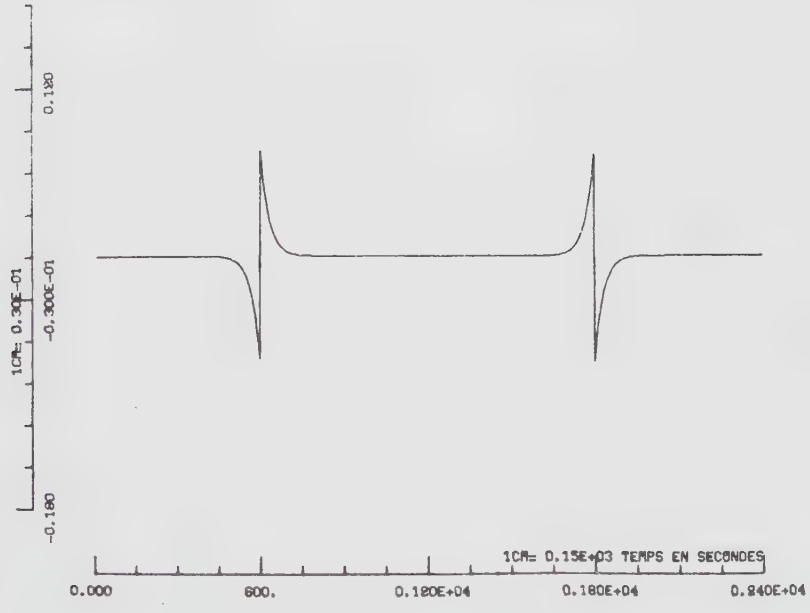


Fig. 5-9-b- EVOLUTION DE L'ERREUR SUR LA DERIVEE DE TEMPERATURE

On peut noter les points suivants :

a) Températures (fig. 5-5) :

En a on obtient la courbe de réponse classique d'un système du second ordre à une rampe. La température ne commence à évoluer que pour $t = T_d$.

En b, au contraire, on vérifie que la courbe de réponse est en quelque sorte symétrisée par rapport à un point central de coordonnées (1 200 s, 290°C), symétrie que l'on retrouve dans toutes les autres figures et qui est une caractéristique de l'emploi de la consigne anticipative.

b) Dérivées de température (fig. 5-6) :

On constate le même phénomène. En b, pour $t = T_d$ x_2 a déjà atteint la valeur $\alpha/2$ alors qu'elle est toujours nulle en a.

c) Variables de commande (fig. 5-7)

Etant donné les faibles valeurs de μ et λ, u a sensiblement le même ordre de grandeur dans les deux cas. Par contre, et ceci est très important dans le cas présent, la boucle subirait, théoriquement dans le cas a une accélération infinie aux temps $t = T_d$ et $t = T_f$. En b, au contraire, on constate que l'accélération conserve une valeur modérée tout au long du cycle.

d) Erreurs sur la température (fig. 5-8)

Cette figure met en évidence un autre point caractéristique de l'utilisation de la consigne anticipative. On observe en effet que celle-ci supprime complètement l'erreur de traînée même dans le cas où, comme ici, on ne demande pas au système une grande précision. L'erreur maximale, en valeur absolue, a lieu pour $t = T_d$ et $t = T_f$ et est égale à la moitié de l'erreur de traînée en a.

e) Erreurs sur la dérivée (fig. 5-9)

On constate que, là aussi, la valeur absolue de l'erreur est diminuée de moitié en b par rapport au circuit classique.

Lorsque μ et λ ont des valeurs plus grandes, c'est-à-dire que l'on demande au système une plus grande précision, l'allure des courbes de réponse reste sensiblement la même, mais le gain réalisé sur la variable de commande u dans le second cas apparaît plus nettement. La figure 5-10 montre l'évolution de u pour :

$$\mu = 1.10^{-2}$$

$$\lambda = 1.10^{-2}$$

Outre les remarques faites précédemment, on voit que, là encore, l'emploi de la consigne anticipative permet de réduire environ d'un facteur 2 l'amplitude maximale du signal de commande.

En conclusion, la caractéristique essentielle dans le cas présent d'un tel système est de fonctionner si l'on peut dire "en douceur", ce qui évite de fatiguer le matériel et améliore ainsi sa fiabilité et sa sécurité de fonctionnement.

5.2. - REGULATION

5.2.1. Equation de transition du système échantillonné

La régulation en température se fait, pour les boucles de type HTR, par action sur la position de la vanne du circuit secondaire de refroidissement du barreau de combustible. L'étude d'enregistrements d'expériences réelles montre que, compte tenu toujours de l'estimation des paramètres, le fonctionnement de la boucle peut être alors représenté par une équation linéaire du premier ordre. La vanne sera entraînée par un moteur pas à pas. La fonction de transfert de l'ensemble est donc :

$$G(s) = \frac{K}{s\ (1 + T_m s)} \qquad (5\text{-}45)$$

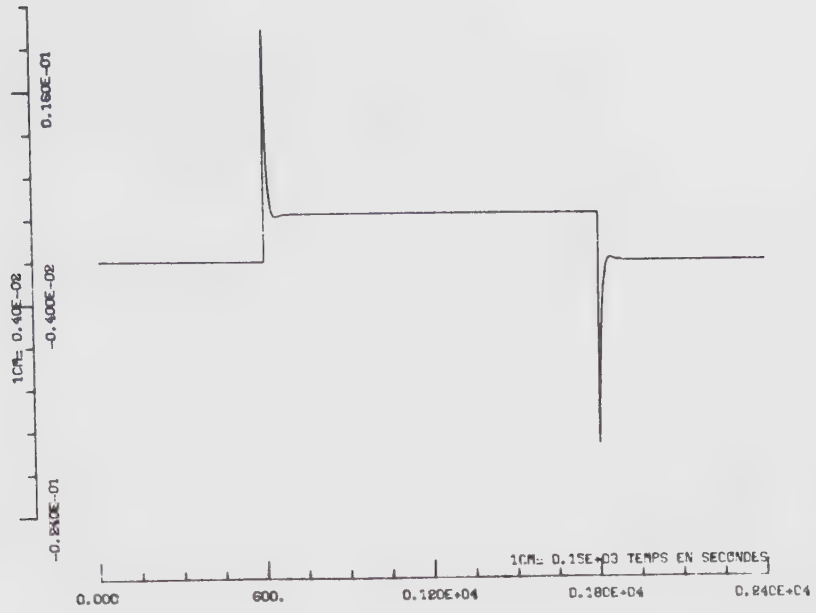


Fig. 5-10-a- EVOLUTION DU SIGNAL DE COMMANDE. DEUXIEME EXEMPLE

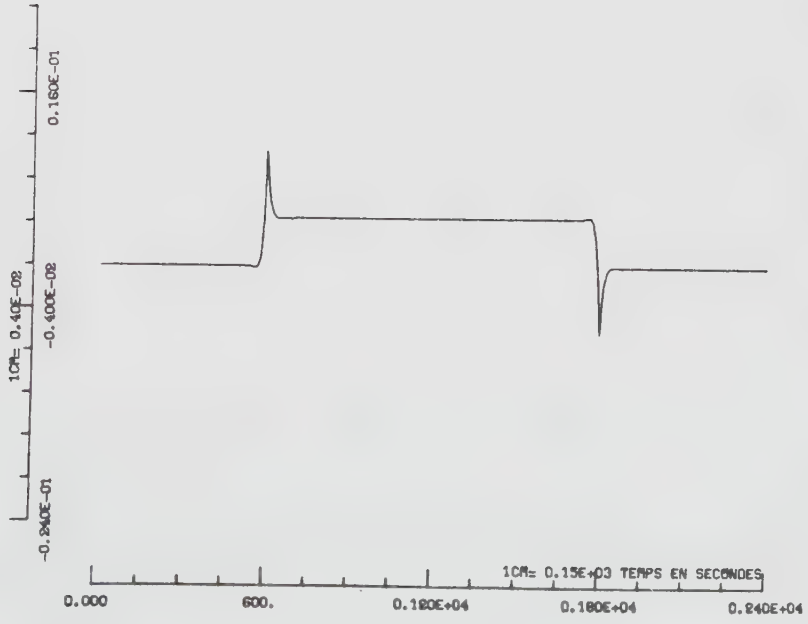


Fig. 5-10-b- EVOLUTION DU SIGNAL DE COMMANDE. DEUXIEME EXEMPLE

Soit :

x_1 la température du barreau de combustible à régler

x_2 la dérivée par rapport au temps de x_1

u le signal de commande au signe près.

La fonction de transfert (5-45) donne, en régime continu, le système:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{x_2}{T_m} + \frac{K}{T_m} u \end{aligned} \qquad (5\text{-}46)$$

K représentant le gain total en boucle ouverte du système et T_m sa constante de temps. Soit vectoriellement :

$$\dot{x} = Ax + bu \qquad (5\text{-}47)$$

avec :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_m} \end{bmatrix} \quad , \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T_m} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}48)$$

Nous avons vu, plus haut, qu'en réalité l'unité de commande travaille en temps partagé. C'est-à-dire que, si l'on considère une boucle donnée, on se trouve en présence d'un système échantillonné. Soit T la période d'échantillonnage.

Il est possible d'obtenir, à partir du système continu (5-47) l'équation de transition du système discret [9]. Dans le cas d'un système sans bloqueur cette équation s'écrit :

$$x\,[(n+1)\,T] = \varphi(T)\,x(nT) + \varphi(T)\,b\,u(nT) \qquad (5\text{-}49)$$

avec :

$$\varphi(T) = \mathcal{L}^{-1}\left\{[s\,I - A]^{-1}\right\} \qquad (5\text{-}50)$$

I étant la matrice unité et $\mathcal{L}^{-1}$ représentant la transformation inverse de Laplace. On obtient, à partir de (5-48) :

$$\varphi(T) = \begin{bmatrix} 1 & T_m(1-E) \\ 0 & E \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}51)$$

où :

$$E = e^{-\frac{T}{T_m}}$$

On en déduit :

$$\varphi(T)\, b = \begin{bmatrix} K(1-E) \\ \frac{K\,E}{T_m} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}52)$$

On a donc, en notation simplifiée :

$$\begin{aligned} x_{1+} &= x_1 + T_m(1-E)\, x_2 + K(1-E)\, u \\ x_{2+} &= E\, x_2 + \frac{K\,E}{T_m}\, u \end{aligned} \qquad (5\text{-}53)$$

Posons, en supposant nulle la température de consigne :

$$u(nT) = - k_1\, x_1(nT) - k_2\, x_2(nT) \qquad (5\text{-}54)$$

Le système (5-53) devient alors :

$$\begin{aligned} x_{1+} &= x_1\, [1 - k_1\, K(1-E)] + x_2(1-E)\, (T_m - K\, k_2) \\ x_{2+} &= - \frac{K\,E}{T_m}\, k_1\, x_1 + x_2\, E(1 - \frac{K}{T_m}\, k_2) \end{aligned} \qquad (5\text{-}55)$$

5.2.2. Extension des méthodes topologiques aux systèmes échantillonnés

Nous avons utilisé, ici aussi, pour étudier la réponse du système, les méthodes topologiques étendues aux systèmes échantillonnés. On peut, à ce propos, faire les remarques suivantes. Le système (5-55) est linéaire. Il est donc suffisant d'étudier son comportement au voisinage de sa position d'équilibre. Les méthodes classiques permettent de définir les conditions de stabilité et de déterminer les valeurs de certaines grandeurs, par exemple le coefficient d'amortissement,

représentatifs de ce comportement. L'emploi des méthodes topologiques, par contre, fournit des renseignements d'ordre qualitatif sur l'évolution du point représentatif dans le plan de phase discret. L'utilisation conjuguée de celles-ci avec une méthode analytique, ici celle de MITROVIC, permet donc d'obtenir une vue d'ensemble complète sur la solution du système.

Ecrivons le système (5-55) sous forme matricielle :

$$x_+ = A\,x \tag{5-56}$$

L'évolution du système, à partir d'une condition initiale, est représentée, dans le plan de phase discret (x_1, x_2), par une suite de points correspondant aux instants d'échantillonnage. On appelle point singulier le point pour lequel :

$$x_{1+} = x_{2+} = 0$$

Le système étant linéaire ce point singulier est unique et constitue une position d'équilibre. On suppose que :

$$x_+ = Z\,I\,x \tag{5-57}$$

Z étant un scalaire et I la matrice unité d'ordre deux. Le système admet des solutions non nulles seulement si :

$$\left|\, A - Z\,I \,\right| = 0 \tag{5-58}$$

C'est l'équation caractéristique du système. Soit Z_1 et Z_2 ses racines. Les méthodes topologiques étendues au cas discret consistent à associer au système échantillonné un système continu ayant au moins une trajectoire de phase passant par les points représentatifs de l'évolution du système discret [24]. La nature du point singulier de ce système continu adjoint dépend des valeurs des racines Z_1 et Z_2.

La solution générale du système (5-57) est :

$$\begin{aligned} x_1(nT) &= A_1\ Z_1^n + A_2\ Z_2^n \\ x_2(nT) &= \lambda_1\ A_1\ Z_1^n + \lambda_2\ A_2\ Z_2^n \end{aligned} \tag{5-59}$$

On lui associe le système continu :

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= A_1\ e^{S_1 t} + A_2\ e^{S_2 t} \\ x_2'(t) &= \lambda_1\ A_1\ e^{S_1 t} + \lambda_2\ A_2\ e^{S_2 t} \end{aligned} \qquad (5\text{-}60)$$

Pour que les points représentatifs de (5-59) soient situés sur une courbe intégrale de (5-60) il faut que :

$$\begin{aligned} x_1'(nT) &= x_1(nT) \\ x_2'(nT) &= x_2(nT) \end{aligned} \qquad (5\text{-}61)$$

Nous allons examiner les divers cas possibles.

A - Les racines Z_1 et Z_2 sont réelles

1. $Z_1 > 0$, $Z_2 > 0$

La condition (5-61) se traduit par :

$$\begin{aligned} Z_1^n &= e^{S_1 nT} \\ Z_2^n &= e^{S_2 nT} \end{aligned} \qquad (5\text{-}62)$$

c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} Z_1 &= e^{S_1 T} \\ Z_2 &= e^{S_2 T} \end{aligned} \qquad (5\text{-}63)$$

d'où :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{T} \operatorname{Log} Z_1 \\ S_2 &= \frac{1}{T} \operatorname{Log} Z_2 \end{aligned} \qquad (5\text{-}64)$$

Si Z_1 et Z_2 sont inférieures à 1, S_1 et S_2 sont négatives. Le point singulier du système continu est un noeud stable. On dira que le point singulier du système discret est un noeud stable de type 1. La figure 5-11 montre l'allure de ce point singulier, les points d'échantillonnage sont numérotés en n.

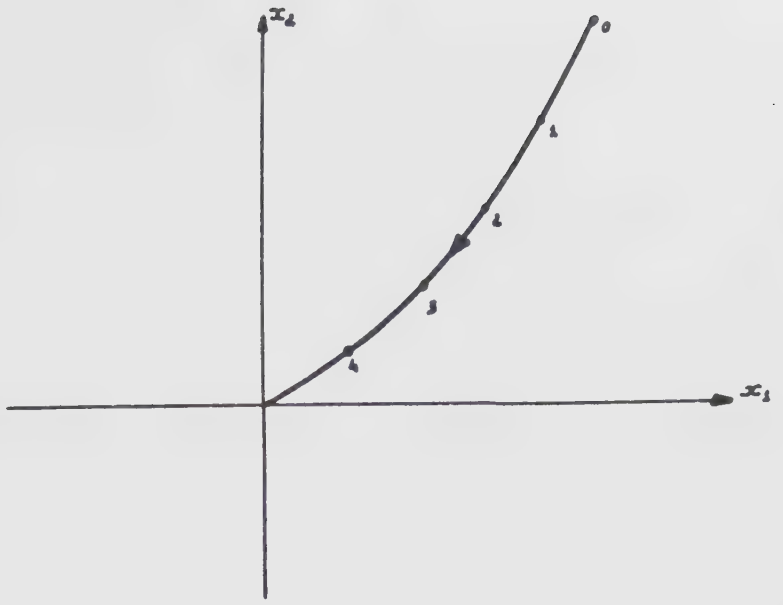


Fig. 5-11- PLAN DE PHASE DISCRET. NOEUD STABLE DE TYPE 1

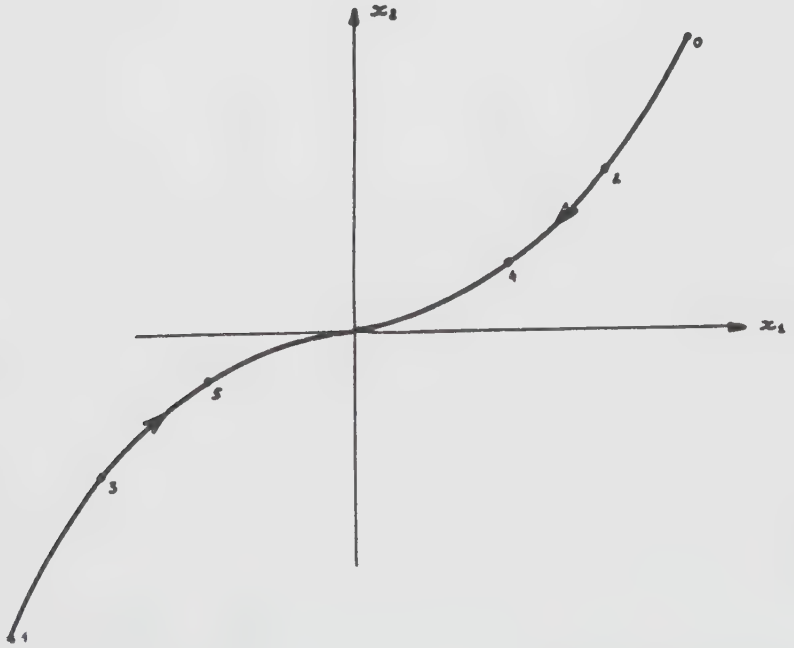


Fig. 5-12- PLAN DE PHASE DISCRET. NOEUD STABLE DE TYPE 2

Si $Z_1 > 1$, $Z_2 > 1$ on a alors un noeud instable de type 1.

Si $Z_1 > 1$, $Z_2 < 1$ on a un col de type 1.

L'allure des trajectoires se déduit directement de celles du système continu.

2. $Z_1 < 0$, $Z_2 < 0$

Z_1^n et Z_2^n seront négatifs pour n impair, positifs pour n pair.

Il est donc nécessaire d'introduire un nouveau système adjoint :

$$\begin{aligned} x_1''(t) &= -A_1 \, e^{S_1 t} - A_2 \, e^{S_2 t} \\ x_2''(t) &= -\lambda_1 A_1 \, e^{S_1 t} - \lambda_2 A_2 \, e^{S_2 t} \end{aligned} \qquad (5\text{-}65)$$

dont les courbes intégrales sont symétriques par rapport à l'origine de celles du système (5-60).

On aura alors :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{T} \operatorname{Log} |Z_1| \\ S_2 &= \frac{1}{T} \operatorname{Log} |Z_2| \end{aligned} \qquad (5\text{-}66)$$

Pour n pair les points représentatifs sont situés sur une courbe intégrale du système (5-60) et pour n impair sur la courbe intégrale correspondante du système (5-65), symétrique de la première par rapport à l'origine.

On a toujours trois cas :

- $|Z_1| < 1$, $|Z_2| < 1$: on a un noeud stable de type 2 (voir figure 5-12)
- $|Z_1| > 1$, $|Z_2| > 1$: on a un noeud instable de type 2
- $|Z_1| > 1$, $|Z_2| < 1$: on a un col de type 2.

3. $Z_1 > 0$, $Z_2 < 0$

Le second système adjoint doit être alors :

$$x_1''(t) = A_1\ e^{S_1 t} - A_2\ e^{S_2 t}$$
$$x_2''(t) = \lambda_2\ A_1\ e^{S_1 t} - \lambda_2\ A_2\ e^{S_2 t} \qquad (5\text{-}67)$$

dont les courbes intégrales sont symétriques par rapport à une droite de celles du système (5-60). S_1 et S_2 se déterminent également à partir de (5-66).

- $|Z_1| < 1$, $|Z_2| < 1$: <u>noeud stable de type 3</u> (voir figure 5-13)
- $|Z_1| > 1$, $|Z_2| > 1$: <u>noeud instable de type 3</u>
- $|Z_1| > 1$, $|Z_2| < 1$: <u>col de type 3</u>

B - Les racines sont imaginaires conjuguées.

Soit :
$$Z_1 = \alpha + j\beta = \rho\ e^{j\varphi}$$
$$Z_2 = \alpha - j\beta = \rho\ e^{-j\varphi} \qquad (5\text{-}68)$$
$$\beta > 0$$

1. $\alpha > 0$

Les racines du système continu doivent être de la forme :

$$S_1 = a + jb$$
$$S_2 = a - jb \qquad (5\text{-}69)$$
$$b > 0$$

On a alors :

$$a = \frac{1}{T} \text{Log } \rho$$
$$b = \frac{\varphi}{T} \qquad (5\text{-}70)$$

soit deux types de point singulier :

- $\rho < 1$: <u>foyer stable de type 1</u>
- $\rho > 1$: <u>foyer instable de type 1</u>

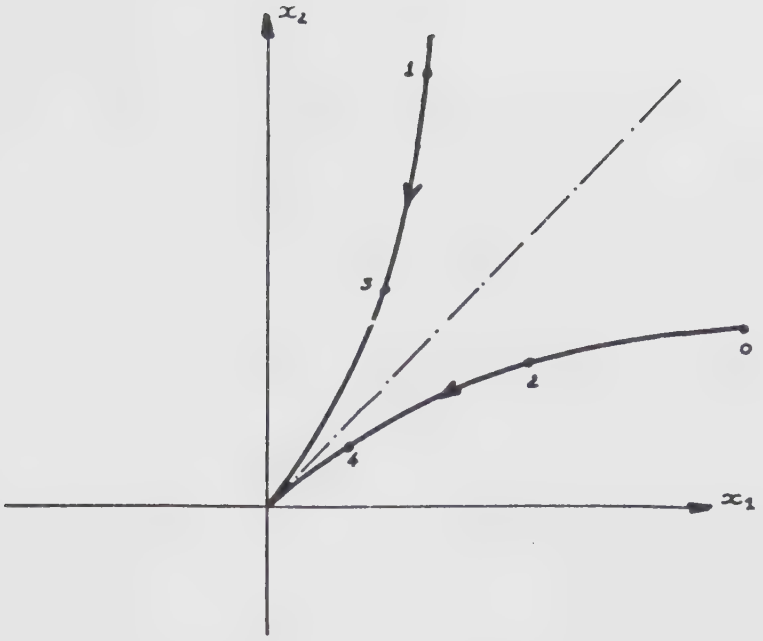


Fig. 5-13- PLAN DE PHASE DISCRET. NOEUD STABLE DE TYPE 3

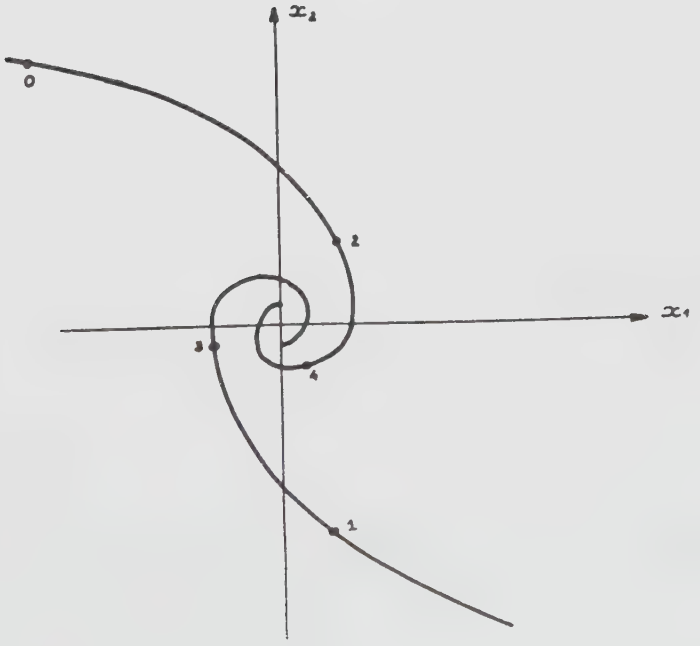


Fig. 5-14- PLAN DE PHASE DISCRET. FOYER STABLE DE TYPE 2

2. $\alpha < 0$

Dans ce cas, φ est négatif.
Donc lorsque n est impair le système adjoint est le système (5-65). Lorsque n est pair on se retrouve dans le cas précédent. Les points représentatifs sont situés alternativement sur deux courbes intégrales symétriques par rapport à l'origine. On a :

- $\rho < 1$: foyer stable de type 2 (voir figure 5-14)
- $\rho > 1$: foyer instable de type 2

Pratiquement, il est plus intéressant, comme dans le cas continu, de pouvoir déterminer la nature du point singulier à partir de l'examen des valeurs des paramètres de l'équation caractéristique. La méthode de MITROVIC a l'avantage de donner, outre ce dernier renseignement, les valeurs de certaines grandeurs caractéristiques du comportement du système.

Cette méthode consiste à poser, par analogie avec le cas continu :

$$Z = - \rho\nu + j\nu \sqrt{1 - \rho^2} \qquad (5\text{-}71)$$

avec :

$$\nu = e^{- \mathcal{S} \omega_n T}$$
$$\rho = - \cos \omega_n T \sqrt{1 - \mathcal{S}^2} \qquad (5\text{-}72)$$

$\mathcal{S}$ et ω_n étant respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système.

Ecrivons l'équation caractéristique (5-58) sous la forme :

$$Z^2 + a_1 Z + a_0 = 0 \qquad (5\text{-}73)$$

En séparant partie réelle et partie imaginaire, on obtient le système :

$$a_1 = 2 \rho \nu$$
$$a_0 = \nu^2 \qquad (5\text{-}74)$$

A - Racines réelles

La condition de réalité des racines est :

$$\rho^2 \geq 1$$

Donc, dans le plan paramétrique (a_0, a_1) la courbe séparant les zones de réalité correspond à :

$$\rho^2 = 1 \qquad (5\text{-}75)$$

L'égalité (5-76) donne :

$$a_0 = \frac{a_1^2}{4}$$

Les racines seront réelles si :

$$a_0 < \frac{a_1^2}{4} \qquad (5\text{-}76)$$

1. Signe des racines

   . racines positives : $a_0 > 0$, $a_1 < 0 \Rightarrow$ point singulier de type 1

   . racines négatives : $a_0 > 0$, $a_1 > 0 \Rightarrow$ point singulier de type 2

   . racines de signes différents : $a_0 < 0 \Rightarrow$ point singulier de type 3

2. Module des racines

   . Les modules encadrant la valeur 1

   Les deux expressions :

   $$(Z_1 - 1) \ , \ (Z_2 - 1)$$

   et $(Z_1 + 1) \ , \ (Z_2 + 1)$

   doivent être de signes différents. Ceci conduit à :

   $$(a_0 - a_1 + 1) \cdot (a_0 + a_1 + 1) < 0 \qquad (5\text{-}77)$$

   Cette zone est délimitée par les deux droites :

   $$\begin{aligned} a_0 &= a_1 - 1 \\ a_0 &= -a_1 - 1 \end{aligned} \qquad (5\text{-}78)$$

   Le point singulier est alors un col.

   . Les modules des deux racines sont supérieurs ou inférieurs à 1.

   La condition (5-77) devient :

   $$(a_0 - a_1 + 1) \cdot (a_0 + a_1 + 1) > 0 \qquad (5\text{-}79)$$

Le point singulier est un noeud

- stable si $|a_0| < 1$
- instable si $|a_0| > 1$

B - Racines imaginaires

Ceci correspond à :

$$a_0 > \frac{a_1^2}{4} \qquad (5\text{-}80)$$

La partie réelle des racines est :

$$\alpha = -\rho \nu$$

• $\alpha > 0$

On a alors : $a_1 < 0 \Longrightarrow$ foyer de type 1

• $\alpha < 0$

C'est-à-dire : $a_1 > 0 \Longrightarrow$ foyer de type 2

Ces foyers seront stables si $a_0 < 1$

La figure 5-15 donne la répartition des points singuliers dans le plan paramétrique (a_0, a_1).

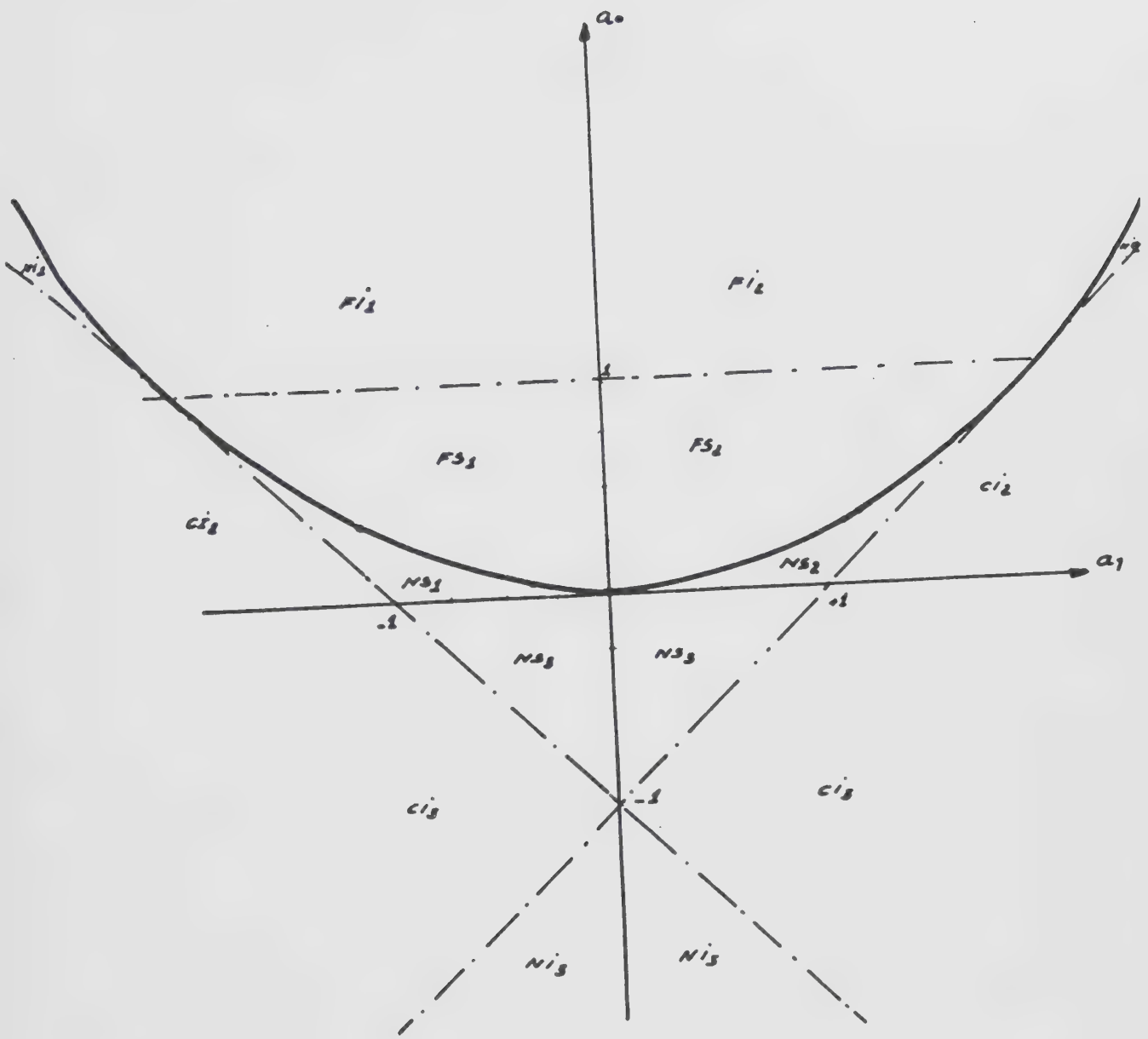
Les équations (5-72 et (5-74) permettent de calculer, pour un couple (a_0, a_1), le coefficient d'amortissement et la pulsation propre. On peut, inversement tracer la courbe correspondant à un ζ donné, en faisant varier ω_n.

Soit t_s le temps de stabilisation, c'est-à-dire celui au bout duquel la réponse à un échelon atteint 98,2 % de la valeur finale. On a la relation :

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n}$$

donc :

$$\nu = e^{-\frac{4T}{t_s}} \qquad (5\text{-}81)$$



Légende

C = Col
F = Foyer
N = Noeud
I = Instable
S = Stable
1 = type 1
2 = type 2
3 = type 3

Exemple NI_3 = Noeud. Instable. type 3

Fig. 5-15- PLAN PARAMETRIQUE. REPARTITION DES POINTS SINGULIERS

Pour un système oscillatoire l'instant du premier pic est :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

donc :

$$\rho = - \cos \frac{T \pi}{t_p}$$

5.2.3. Synthèse du système de commande

L'équation caractéristique du système (5-55) est :

$$Z^2 + a_1 Z + a_0 = 0$$

avec :

$$a_1 = k_1 K(1-E) - 1 - E(1 - k_2 \frac{K}{T_m}) \qquad (5\text{-}82)$$

$$a_0 = E(1 - k_2 \frac{K}{T_m})$$

D'une façon théorique, le fait de fixer les valeurs de k_1 et k_2 permet donc de déterminer complètement le comportement du système. Pour un couple (a_1, a_2) donné, on peut exprimer k_1 et k_2 en fonctions de E, K et T_m. Or nous avons vu que K et T_m ne sont pas connus a priori mais que leurs valeurs sont estimées par le calculateur. On a donc intérêt à se placer dans une zone de réglage où une erreur sur l'estimation de ces paramètres ne risque pas de perturber trop gravement la stabilité du système.

Le système (5-82) peut s'écrire :

$$a_1 = m - a_0$$

avec :

$$m = k_1 K(1-E) - 1$$

L'estimation du gain K en boucle ouverte peut se faire de façon rapide et précise. D'autre part, la sensibilité de

$E = e^{-\frac{T}{T_m}}$ par rapport à T_m est faible. Donc, une fois le gain k_1 fixé,

la valeur du coefficient m ne devrait pas être fortement perturbée par des variations des paramètres du système.

Par contre, a_0, et donc k_2, dépend directement de la détermination de T_m, paramètre dont l'estimation ne peut pas se faire avec une grande précision. De plus, l'équation (5-54) montre que le gain k_2 s'applique sur la dérivée de température. Or, de même que dans le cas de la régulation des boucles classiques, cette dérivée devra être estimée. D'où une nouvelle source d'erreur qui peut être assimilée à une erreur sur k_2.

Donc le point de fonctionnement, dans le plan (a_0, a_1) va se déplacer pratiquement, autour de la position correcte, sur une droite de pente -1 et coupant l'axe vertical pour :

$$a_0 = m$$

Il est nécessaire de choisir une valeur de m, c'est-à-dire de k_1, pour laquelle le système ne risque pas, dans des conditions normales, de devenir instable.

D'autre part, étant donné que l'on n'impose pas, dans le cas présent, de contraintes sur la variable de commande, on a intérêt à avoir un temps de stabilisation t_s aussi court que possible. L'examen de (5-81) indique que cette condition est réalisée pour :

$$\nu = 0$$

c'est-à-dire :

$$a_0 = a_1 = 0$$

ou :

$$k_1 = \frac{1}{K(1-E)}$$

$$k_2 = \frac{T_m}{K} \qquad (5\text{-}83)$$

On peut constater, sur le système (5-55), qu'à partir d'une condition initiale quelconque, x_1 est nul à la première période d'échantillonnage et x_2 à la seconde.

Ce type de réponse est appelé "réponse pile".
m étant alors nul et compte tenu des réserves faites précédemment le

point de fonctionnement se déplace, en cas de perturbations ou de mauvaise estimation des paramètres, sur la droite :

$$a_0 = -a_1$$

On aura donc, selon le cas, un foyer stable de type 1 ou un noeud stable, la réponse pile correspondant à un point singulier d'ordre multiple. Ce point de fonctionnement semble correct puisque normalement il correspond à la meilleure réponse possible et qu'en cas de perturbations on dispose d'une marge de stabilité assez grande.

Cette étude ne tient compte que des points d'échantillonnage. Il est donc nécessaire de vérifier que le fonctionnement reste correct entre ces points. La réponse complète est donnée par :

$$x_1(nT+v) = [1 - k_1 K(1-E')]\, x_1(nT) + (1-E')(T_m - K k_2)\, x_2(nT) \qquad (5\text{-}84)$$

$$x_2(nT+v) = -\frac{K E'}{T_m} k_1\, x_1(nT) + E'\left(1 - \frac{K}{T_m} k_2\right) x_2(nT)$$

avec :

$$0 < v \leq T$$

$$E' = e^{-\frac{v}{T_m}}$$

Une série de simulations sur calculateur numérique ont permis de vérifier le bon fonctionnement d'un tel système. Les figures 5-16 à 5-19 ont été tracées pour les valeurs de paramètres suivantes :

$$K = 200$$

$$T = 30 \text{ s}$$

$$T_m = 360 \text{ s}$$

Les figures notées a montrent, dans chaque cas, l'allure d'une courbe intégrale dans le plan de phase (x_1, x_2). Les figures notées b montrent l'évolution correspondante de la variable de sortie en fonction du temps. Les points repérés sur les courbes correspondent aux instants d'échantillonnages.

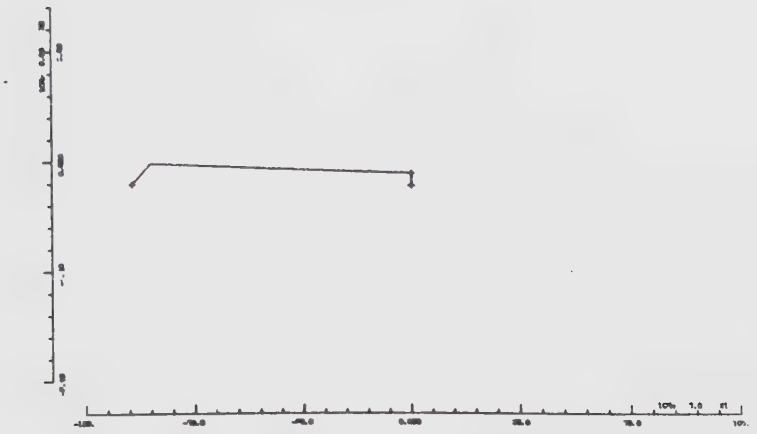


Fig. 5-16-a- PLAN DE PHASE. REPONSE PILE

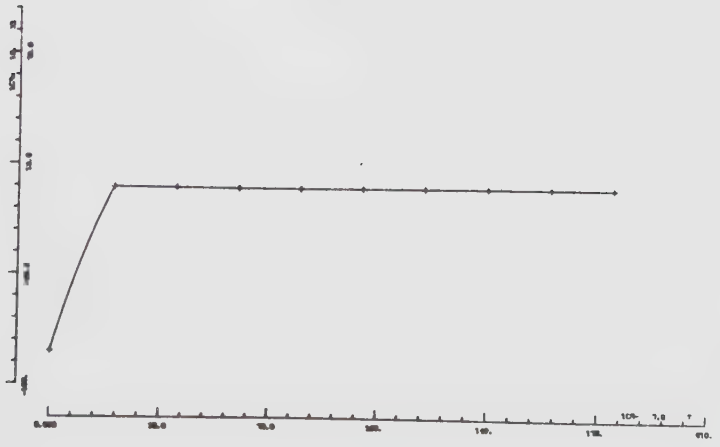


Fig. 5-16-b- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE. REPONSE PILE

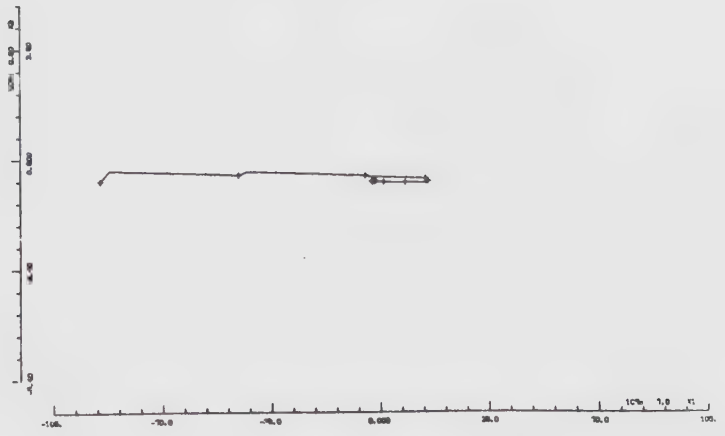


Fig. 5-17-a- PLAN DE PHASE. FOYER STABLE TYPE 1

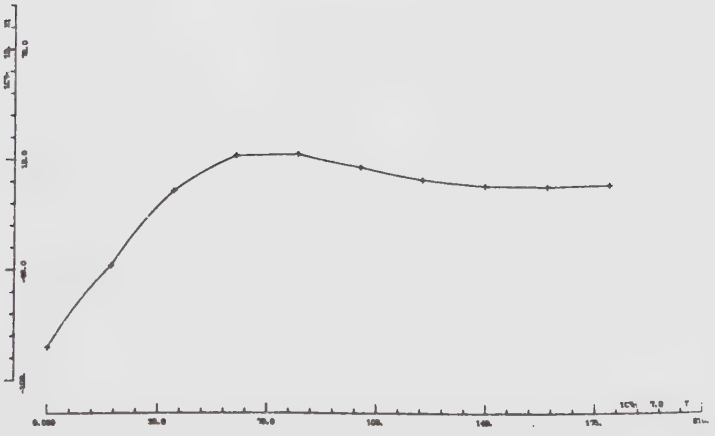


Fig. 5-17-b- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE. FOYER STABLE TYPE 1

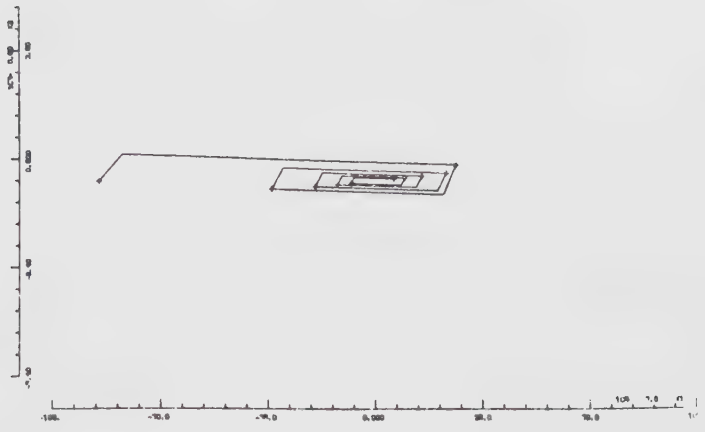


Fig. 5-18-a- PLAN DE PHASE. NOEUD STABLE TYPE 3

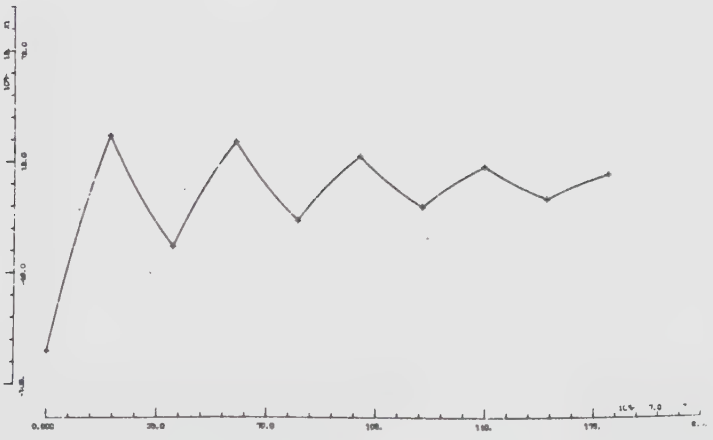


Fig. 5-18-b- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE. NOEUD STABLE TYPE 3

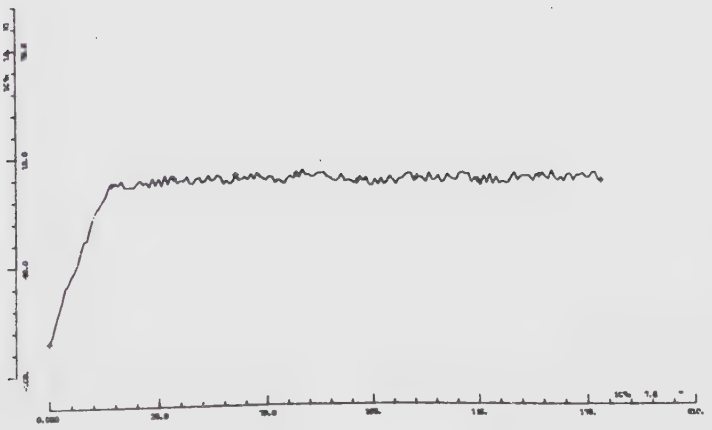


Fig. 5-19- REPONSE PILE AVEC PERTURBATIONS

La figure 5-16 correspond au cas d'une réponse pile avec une estimation correcte des paramètres. C'est-à-dire :

$$a_0 = a_1 = 0$$

$$k_1 = 1{,}17\ 10^{-2}$$

$$k_2 = 1{,}8$$

Soit T'_m la valeur estimée de la constante de temps T_m.

La figure 5-17 a été tracée pour :

$$T'_m = 100$$

donc :

$$k_1 = 5{,}78\ 10^{-3} \qquad a_1 = -0{,}92$$

$$k_2 = 0{,}5 \qquad a_2 = 0{,}414$$

On a bien un foyer stable de type 1.

La figure 5-18 correspond à :

$$T'_m = 500$$

et :

$$k_1 = 1{,}5\ 10^{-2} \qquad a_1 = 0{,}516$$

$$k_2 = 2{,}5 \qquad a_2 = -0{,}22$$

Le point singulier est, comme prévu, un noeud stable de type 3.

La figure 5-19 a été tracée dans les mêmes conditions que la figure 5-16 mais en supposant l'existence d'un bruit aléatoire de mesure de la variable de sortie correspondant à une erreur maximum de $\pm$ 3°C et une erreur d'estimation de la dérivée de $\pm$0,01°C/s.

L'examen de ces courbes montre qu'un système réglé pour avoir une réponse pile est sensible aux bruits de mesure. En réalité, les températures étant mesurées à l'aide d'un voltmètre intégrateur, les valeurs des bruits de mesure sont nettement inférieures à celles supposées ci-dessus. De plus la structure même du moteur pas-à-pas introduit un seuil. Ceci entraîne que la vanne ne sera actionnée que pour des erreurs notables de température et non à cause des erreurs de mesure.

5.3. - ESTIMATION DES PARAMETRES

Cette estimation des paramètres a deux buts :

— permettre à l'unité de commande de s'adapter à n'importe quel type de boucles ou conditions de fonctionnement;

— corriger en permanence l'action des diverses perturbations susceptibles de modifier, en cours de fonctionnement, les valeurs des paramètres du système.

La caractéristique essentielle de cette estimation doit être la rapidité. En effet, au début d'une expérience, les paramètres estimés ont des valeurs arbitraires, ce qui risque d'entraîner une instabilité du système bouclé. Il est donc nécessaire que l'unité de commande puisse rapidement estimer les valeurs réelles des paramètres de la boucle d'irradiation pour revenir à des conditions correctes de fonctionnement, même si cette estimation ne se fait pas avec une très grande précision.

Qu'il s'agisse de régulation ou de commande de cyclages, deux paramètres doivent être estimés : le gain K en boucle ouverte et la constante de temps T_m. Nous allons d'abord décrire la méthode générale utilisée avant d'examiner les deux types de commande.

5.3.1. Méthode générale

Considérons les échantillons successifs x(0), x(1),...,x(N) de la variable de sortie du système et les valeurs correspondantes u(1),..., u(N-1) de la variable de commande à partir d'un instant donné. Si on applique à un modèle numérique, caractérisé par les paramètres K' et T_m' et les conditions initiales x(0) et x(1), les mêmes signaux de commande, la réponse de ce modèle sera représentée par la suite d'échantillons x'(2),..., x'(N).

Soit :

$$\mathcal{E} = \sum_{i=2}^{N} [x'(i) - x(i)]^2 \qquad (5\text{-}85)$$

Ce signal d'erreur sera nul seulement si :

$$K' = K$$

$$T'_m = T_m$$

La méthode consiste donc à faire une recherche itérative des valeurs de K' et T'_m annulant $\mathcal{E}$. En pratique cette recherche est faite par le calculateur entre deux périodes d'échantillonnage. L'algorithme de recherche est basé sur l'utilisation de la méthode PARTAN [2]. Considérons, dans le plan paramétrique (K', T'_m), les courbes de niveau correspondant à un $\mathcal{E}$ constant. Soit I le point représentatif des valeurs initiales des paramètres au début de la recherche (figure 5-20) et S le point correspondant à $\mathcal{E} = 0$.

La méthode consiste à rechercher successivement, en faisant varier à chaque fois un seul paramètre, la position des points A, B et C correspondant à un minimum local de $\mathcal{E}$ par rapport au paramètre considéré. Si les courbes de niveaux sont homothétiques entre elles, ce qui est vrai en général au moins au voisinage de l'optimum S, les points A, C et S sont alignés. La dernière phase de la recherche consiste alors à déplacer le point représentatif sur la droite AC jusqu'à rencontrer le point S. Si celui-ci n'est pas atteint il est nécessaire de recommencer un autre cycle à partir du minimum local obtenu.

La vitesse de convergence vers l'optimum est essentiellement fonction des valeurs des pas $\Delta K'$ et $\Delta T'_m$. Il est évident que celles-ci doivent être d'autant plus faibles que le point représentatif se trouve près du minimum local recherché. C'est pourquoi le pas de départ est fixe, mais sa valeur est divisée par deux à chaque fois que le minimum est dépassé.

L'algorithme utilisé est schématisé par l'organigramme de la figure 5-21.

L'avantage de cette méthode, outre sa rapidité, est de ne présenter aucun problème de stabilité. De plus, elle reste valable même si le système est invariant, le modèle conservant alors les mêmes valeurs estimées des paramètres.

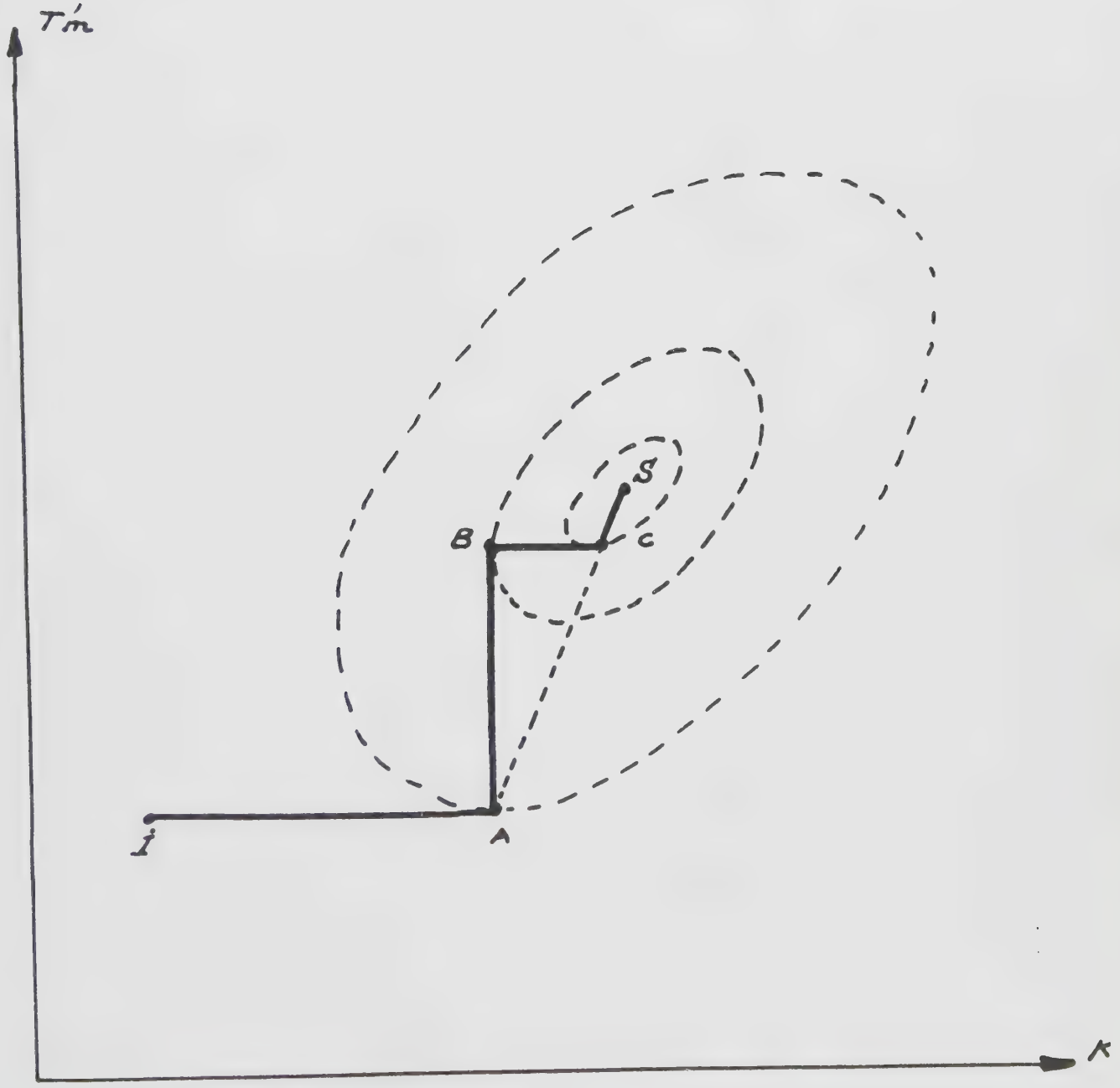


Fig. 5-20- PRINCIPE DE LA METHODE PARTAN

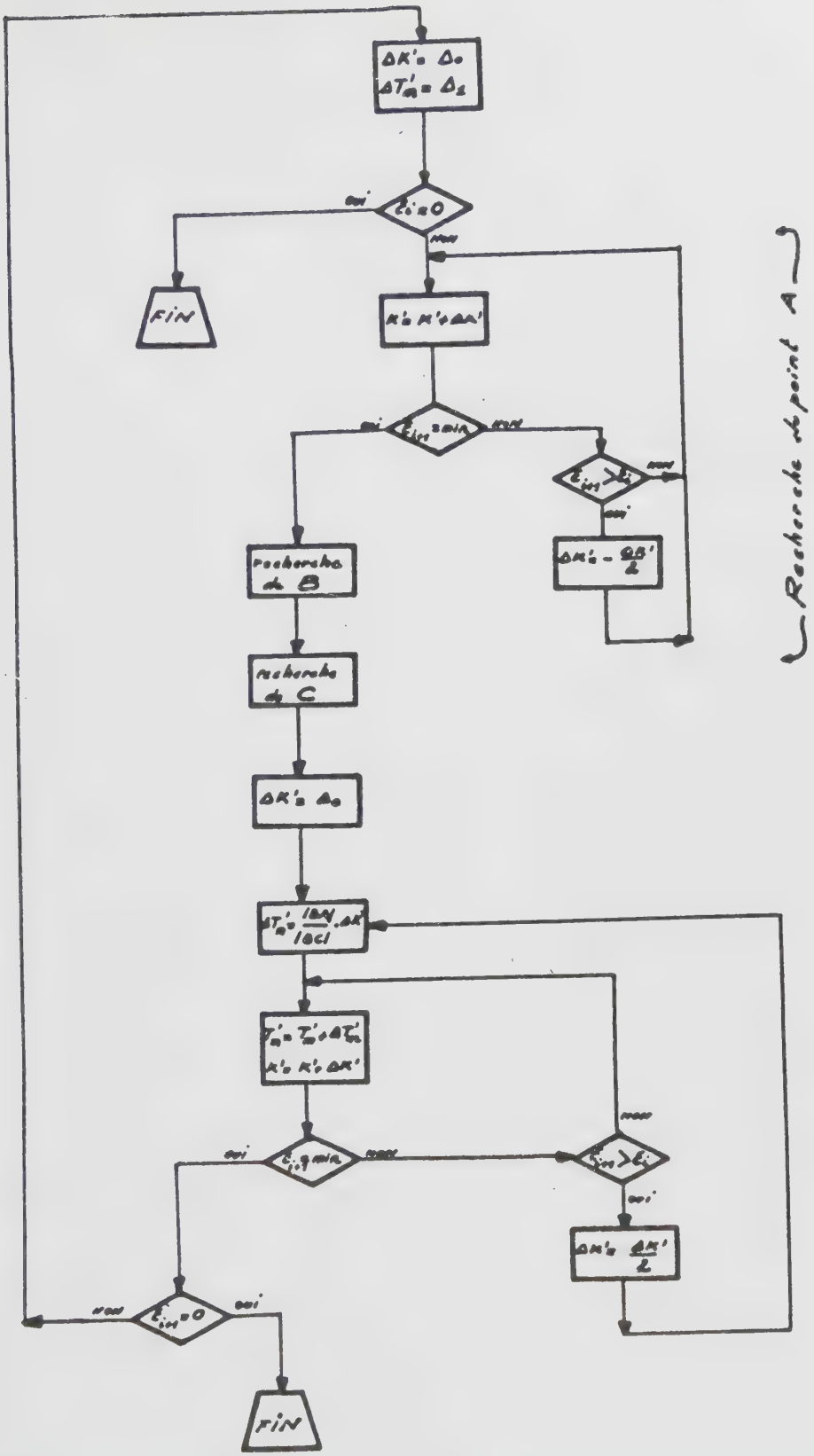


Fig. 5-21- ESTIMATION DES PARAMETRES. ORGANIGRAMME

5.3.2. Régulation

En utilisant la transformation en Z on obtient, à partir du système (5-53) :

$$\begin{aligned} Z\,X_1 &= X_1\,T_m(1-E)\,X_2 + K(1-E)\,U \\ Z\,X_2 &= E\,X_2 + \frac{K\,E}{T_m}\,U \end{aligned} \qquad (5\text{-}86)$$

où X_1, X_2 et U sont les transformées en Z de x_1, x_2 et u.

L'élimination de X_2 fournit la fonction de transfert échantillonnée :

$$X_1 = \frac{Z}{(Z-1)\,(Z-E)}\,K(1-E)\,U \qquad (5\text{-}87)$$

c'est-à-dire :

$$x_1[(n+2)T] = (1+E)\,x_1[(n+1)T] - E\,x_1(nT) + K(1-E)\,u\,[(n+1)T] \qquad (5\text{-}88)$$

A partir des valeurs initiales $x_1(nT)$ et $x_1[(n+1)T]$ et connaissant les valeurs successives de la variable de commande u, on peut ainsi calculer, de proche en proche, l'évolution du modèle numérique.

Théoriquement il suffit de quatre échantillons de la variable de sortie pour déterminer parfaitement K et T_m. En réalité, compte tenu des bruits de mesure, on obtient une estimation beaucoup plus précise en comparant le système réel et le modèle sur une période un peu plus longue.

La figure 5-22 représente l'évolution du point représentatif dans le plan (K', T_m') à partir de :

$$K' = 120$$

$$T_m' = 300\ s$$

pour les conditions réelles suivantes :

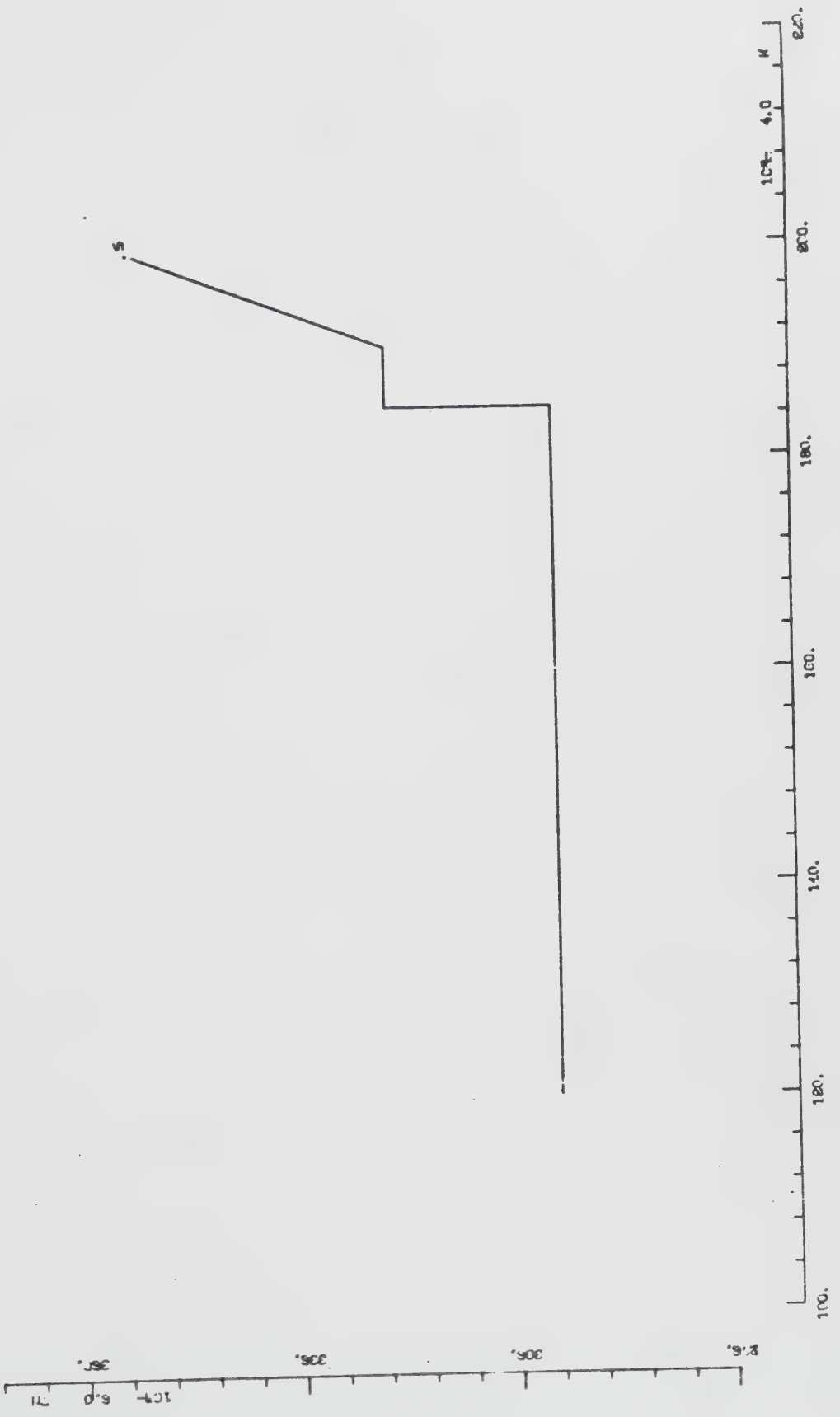


Fig. 5-22- ESTIMATION DES PARAMETRES SUR QUATRE ECHANTILLONS

$K = 200$

$T_m = 360$ s

$T = 30$ s

$x_1(0) = 500$ °C

$x_2(0) = 500$ °C

$u(1) = 0,5$

$u(2) = 0$

$N = 4$

$\Delta 0 = 20$

$\Delta 1 = 40$

La figure 5-23 illustre l'effet de la superposition à la mesure de la température d'un bruit aléatoire d'amplitude maximum ± 1°C. On constate que le système ne converge pas vers les valeurs réelles de K et T_m.

Par contre la figure 5-24, tracée dans les mêmes conditions que la précédente mais avec N = 6, montre qu'un accroissement même minime de la période de comparaison améliore sensiblement la précision de l'estimation.

Enfin, la figure 5-25 illustre l'action de l'estimation sur la réponse du système bouclé. Les conditions de fonctionnement de celui-ci correspondent à celles de l'enregistrement de la figure 5-16 mais en supposant que K' et T_m' ont les valeurs initiales ci-dessus. La comparaison est faite également sur 6 échantillons.

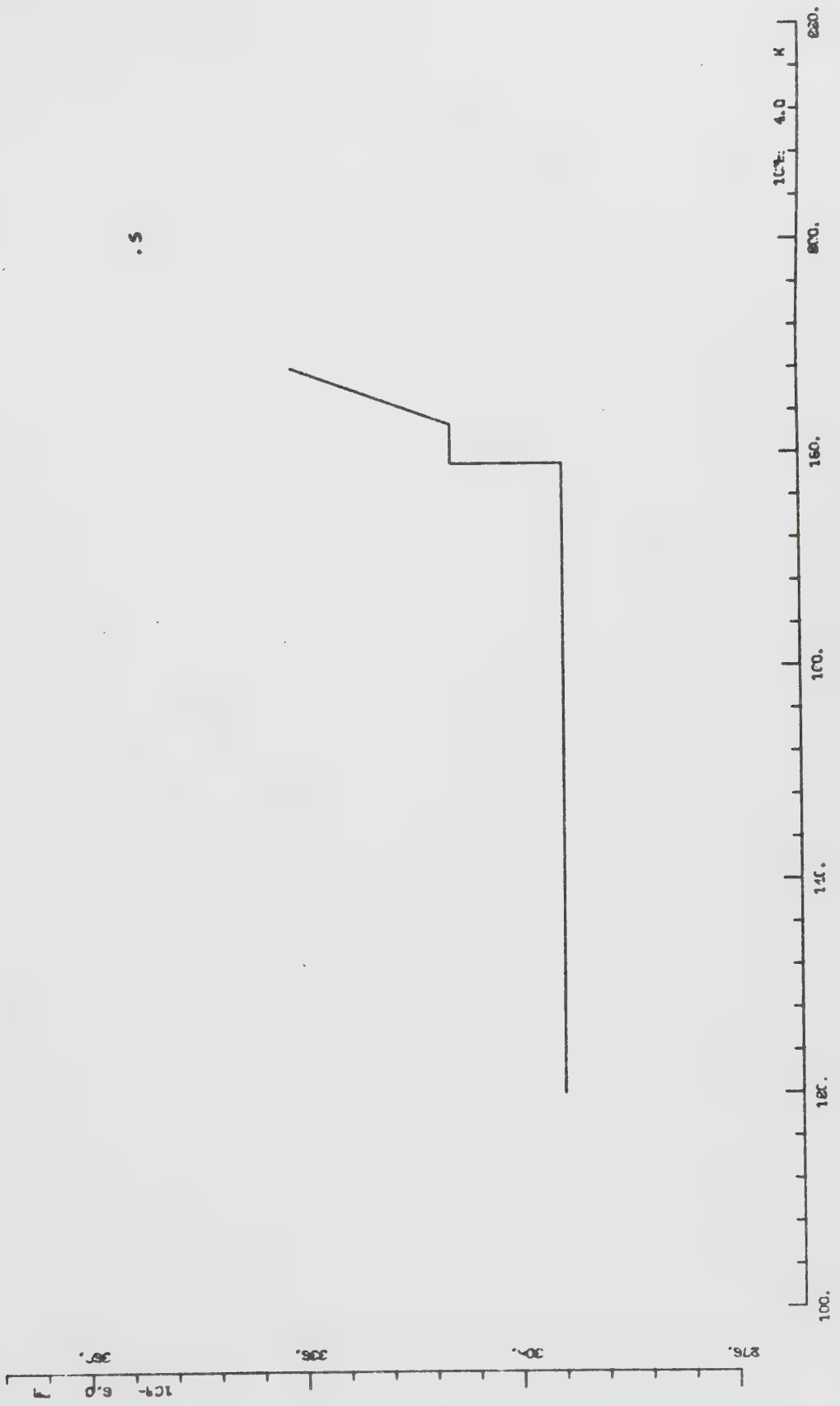


Fig. 5-23- ESTIMATION DES PARAMETRES SUR QUATRE ECHANTILLONS AVEC PERTURBATIONS

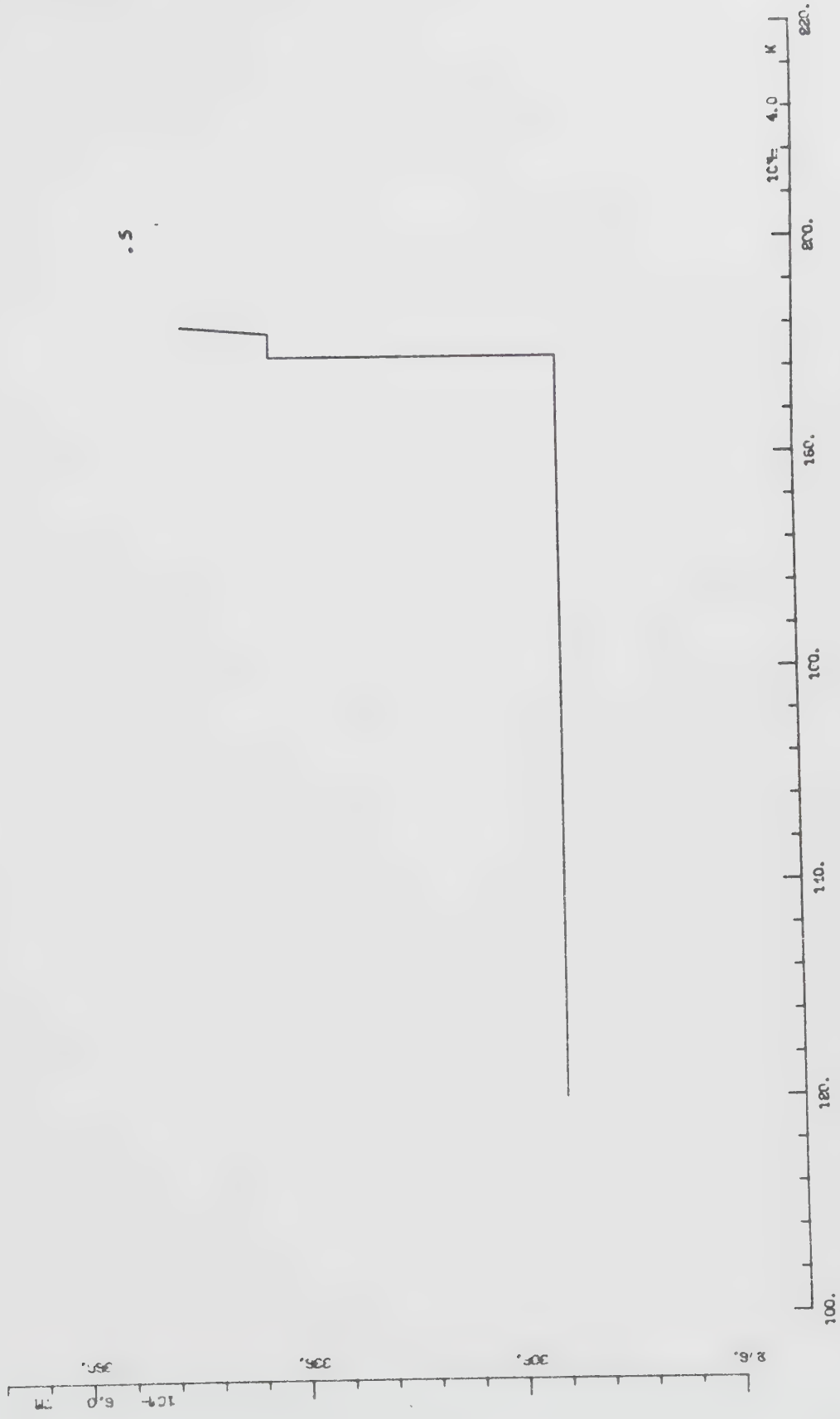


Fig. 5-24- ESTIMATION DES PARAMETRES SUR SIX ECHANTILLONS AVEC PERTURBATIONS

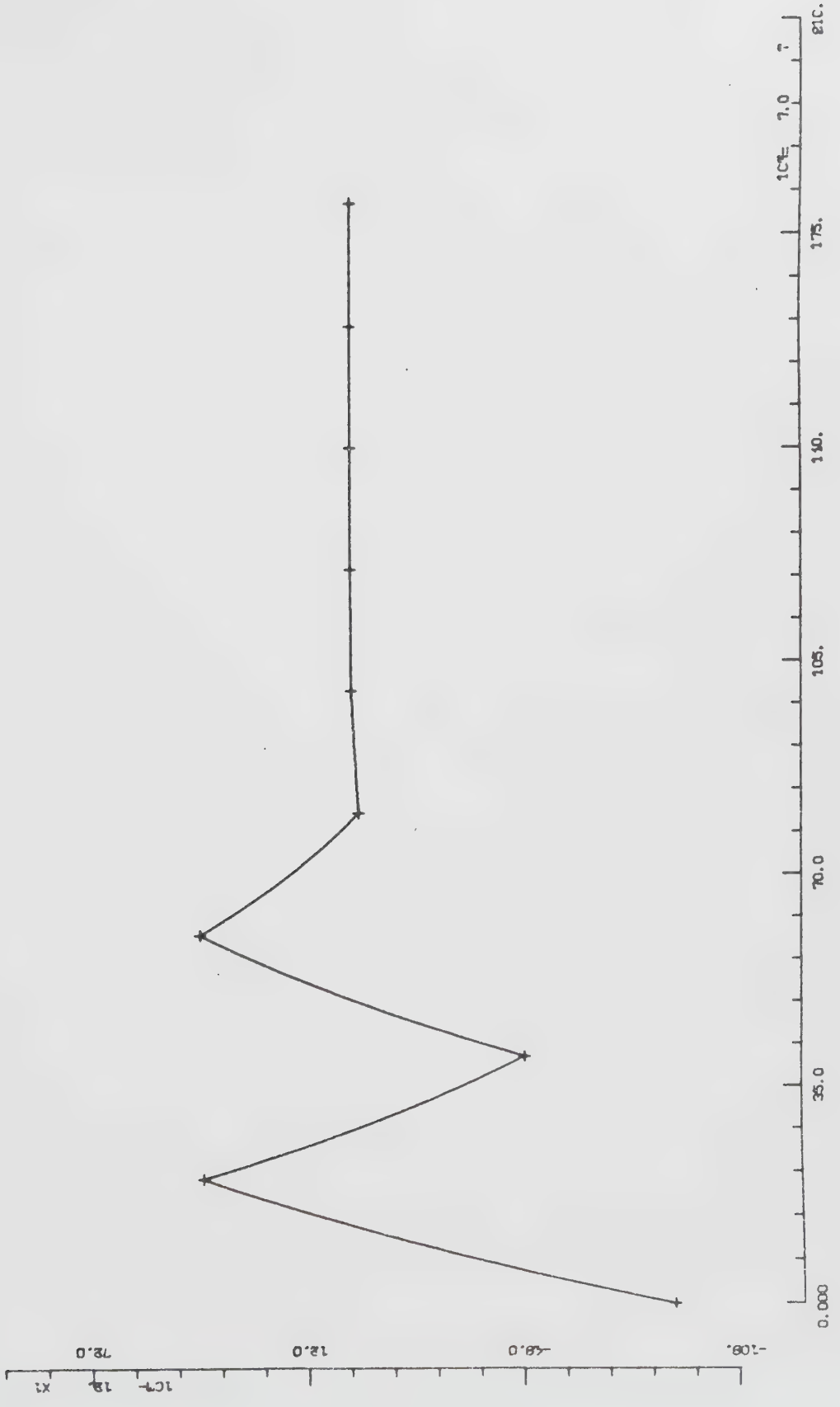


Fig. 5-25- REPONSE DU SYSTEME AVEC ESTIMATION

5.3.3. Commande des cyclages

Le fonctionnement d'une boucle d'irradiation en cyclage est représenté par le système :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 \\ \dot{x}_2 &= u - a\, x_2 \end{aligned} \qquad (5\text{-}27)$$

ou, en introduisant le gain en boucle ouverte K :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{K}{T_m} v - \frac{x_2}{T_m} \end{aligned} \qquad (5\text{-}89)$$

avec :

$$u = \frac{K}{T_m} v$$

$$a = \frac{1}{T_m}$$

En réalité ce système est commandé par un échantillonneur-bloqueur composé du calculateur et d'un moteur pas à pas. La fonction de transfert échantillonné s'écrit :

$$X_1 = \frac{T(Z-E) - T_m(1-E)\,(Z-1)}{(Z-1)\,(Z-E)}\, KV \qquad (5\text{-}90)$$

soit :

$$\begin{aligned} x_1[(n+2)T] = (1+E)\, x_1[(n+1)T] - E\, x_1(nT) + K\,[T - T_m(1-E)]\, v[(n+1)T] \ldots \\ \ldots - K\,[TE - T_m(1-E)]\, v(nT) \end{aligned} \qquad (5\text{-}91)$$

Le problème de l'estimation des paramètres se ramène donc à celui du cas précédent. Il faut noter cependant qu'ici la connaissance de v(nT) est nécessaire. D'autre part, la période d'échantilonnage T étant beaucoup plus courte, il sera possible d'effectuer la comparaison système réel-modèle sur un nombre d'échantillons plus grand.

6 - PROJET DE REALISATION

6.1. - STRUCTURE DE L'UNITE DE COMMANDE

Nous avons vu, au chapitre 4, quelles devaient être les caractéristiques de l'unité de commande au point de vue technologique, essentiellement :

- une haute fiabilité et une grande facilité de maintenance;
- un caractère très évolutif.

Les deux organes essentiels du système de commande sont, par conséquent :

- un calculateur "temps réel" ;
- un ensemble électronique modulaire en standard CAMAC assurant la liaison entre le calculateur et les organes de mesure et de commande.

Les commandes se font, dans tous les cas, par l'intermédiaire de moteurs pas à pas actionnant soit les vannes du circuit secondaire de refroidissement, soit le système d'entraînement des boucles d'irradiation. Par contre les mesures de température sont faites différemment selon qu'il s'agit d'un cyclage ou d'une régulation.

En effet, actuellement, toutes les températures sont mesurées à l'aide d'un centralisateur EXEN 22 de la Société MECI. Ce centralisateur comporte un voltmètre intégrateur d'une période de 1 seconde.

Ce temps de mesure est parfaitement compatible avec ce qui est exigé pour une régulation. Par contre au cours d'un cyclage, les vitesses d'échauffement peuvent être relativement très importants.

De plus, pour des raisons évidentes de sécurité, il est nécessaire que l'unité de commande surveille pratiquement en permanence l'évolution de l'expérience afin de pouvoir réagir très rapidement à tout incident. Il est en effet impératif que cette réaction se produise avant que les systèmes d'alerte de la pile soient déclenchés, ce qui entraînerait un arrêt total de celle-ci par chutes des barres de contrôle.

C'est pourquoi la température relative à un cyclage est mesurée directement par l'ensemble électronique avec un temps de mesure de l'ordre de 20 ms. Ce découplage des circuits de mesure permet donc une surveillance permanente de l'expérience dynamique en cours.

D'autre part l'équipement de la salle de contrôle du réacteur comporte un terminal IBM 2770 relié par télex à l'ordinateur du Centre. Afin de pouvoir traiter rapidement les résultats d'une expérience, il est nécessaire de relier ce terminal à l'unité de commande.

L'étude du couplage de l'EXEN 22 et de l'IBM 2770 à l'unité de commande sortant du cadre général de ce travail, nous n'en ferons pas état ici.

La figure 6-1 est un schéma synoptique de l'unité de commande montrant les liaisons entre les différents organes. Le Télétype ASR 33 est un ensemble imprimante - lecteur et perforateur de rubans permettant de converser avec le calculateur. Il est utilisé par l'opérateur pour introduire dans le programme les données relatives à une expérience donnée.

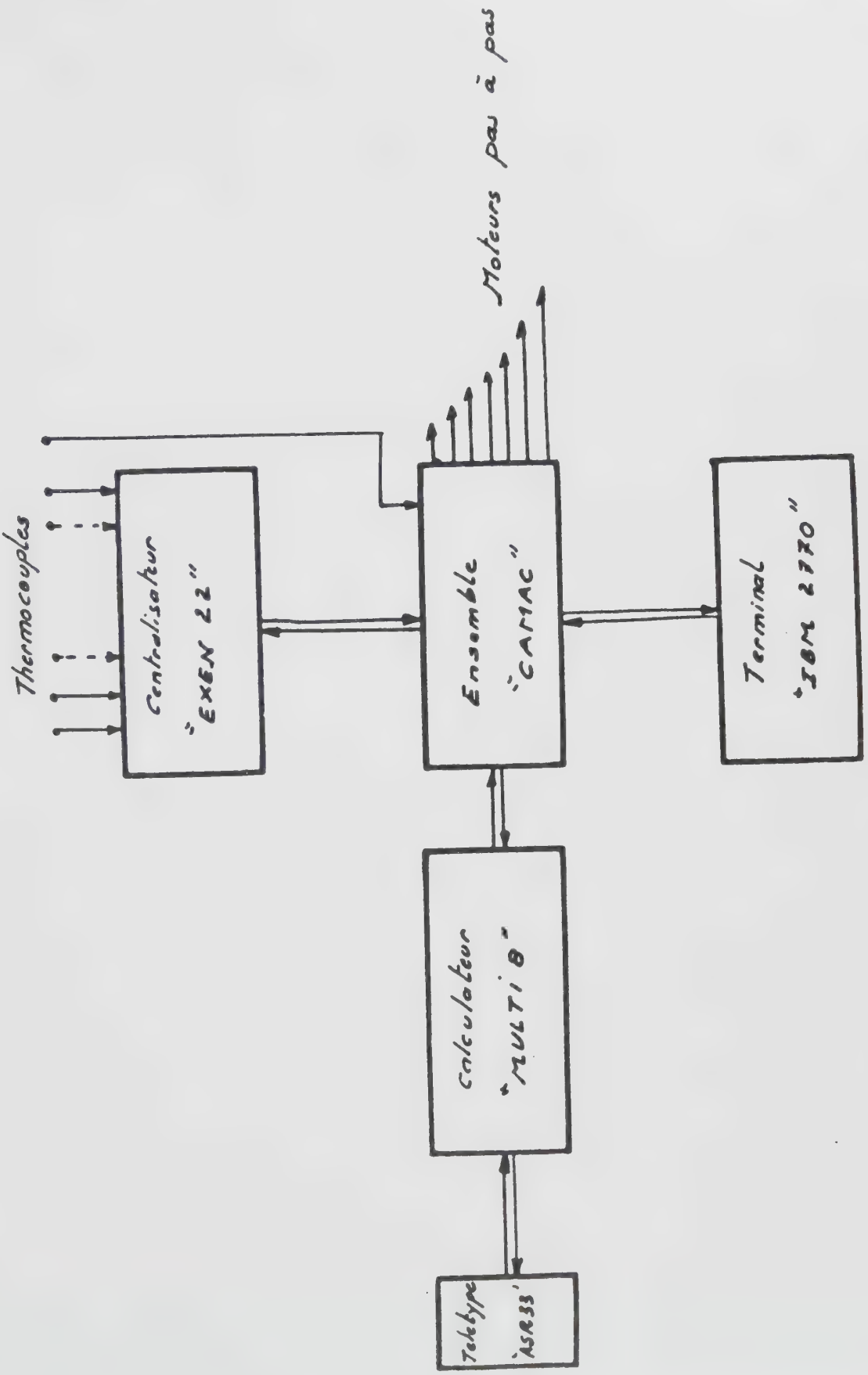


Fig. 6-i- UNITE DE COMMANDE. SCHEMA SYNOPTIQUE

6.2. - LE CALCULATEUR ET L'ENSEMBLE ELECTRONIQUE

L'organe central de l'équipement électronique est un calculateur Multi-8 d'Intertechnique. Le choix de ce type de calculateur a été fait en fonction des critères suivants :

— il est spécialisé dans le travail en temps réel, c'est-à-dire possède un système complet d'entrées-sorties et d'interruptions externes à plusieurs niveaux de priorité;

— sa structure microprogrammée lui confère une vitesse d'exécution relativement importante;

— sa très grande modularité permet de l'adapter exactement à la configuration envisagée et, ultérieurement, d'étendre facilement ses performances selon les besoins;

— sa capacité mémoire (jusqu'à 32 000 octets par blocs de 4 000) est largement suffisante pour la configuration maximale prévue.

Le calculateur est relié d'une part au Télétype ASR 33, d'autre part à l'ensemble électronique réalisé en standard européen CAMAC assurant la liaison avec les organes externes. Ce standard a été spécialement conçu pour travailler en liaison avec un calculateur. Il comporte plusieurs châssis équipés chacun d'un contrôleur de châssis et des tiroirs fonctionnels nécessaires. Chaque tiroir possède une adresse et peut donc être appelé séparément par le calculateur ou envoyer un signal d'interruption à celui-ci. L'intérêt d'une telle structure est qu'elle peut évoluer très facilement par adjonction de nouveaux tiroirs au fur et à mesure des besoins. De plus, le calculateur est relié à l'ensemble par un seul coupleur d'entrée-sortie, ce qui évite la dépense de plusieurs coupleurs spécialisés et donne une plus grande souplesse d'utilisation. Un programme, étudié à la SEIn, permet d'effectuer cette liaison avec du matériel absolument standard de part et d'autre. Enfin, dans sa grande majorité, les tiroirs fonctionnels existent déjà sur le marché ou seront prochainement commercialisés, d'où une grande facilité de maintenance.

Dans la configuration actuellement prévue, le système se compose d'un seul châssis contenant les éléments suivants :

- un contrôleur de châssis. Il assure la liaison entre le calculateur et les tiroirs fonctionnels;

- plusieurs tiroirs de commande de moteurs pas à pas, l'un destiné à commander le système d'avance boucle, les autres les vannes de refroidissement. Ces tiroirs reçoivent du calculateur le nombre de pas que doit effectuer le moteur et génèrent ensuite automatiquement le train d'impulsions correspondant qui est envoyé à celui-ci. Le calculateur peut donc, pendant ce temps passer à une autre tâche;

- un ensemble de deux tiroirs permettant la mesure et la conversion analogique-numérique de la tension d'un thermocouple. Sur cet ensemble doit être connectée la voie concernant le cyclage éventuellement en cours. Le temps de mesure est d'environ 20 ms;

- un tiroir de sécurité qui surveille de façon indépendante du calculateur un certain nombre de paramètres intéressant le fonctionnement des boucles (surveillance de certaines températures, détection rapide de chute de barres etc...) et celui du calculateur (défaut secteur, interruption interne etc...);

- deux tiroirs assurant le couplage au centralisateur EXEN 22 et au terminal IBM 2770.

6.3. - LE PROGRAMME

Les caractéristiques du programme numérique de traitement doivent être identiques à celles de l'ensemble de l'unité de commande, c'est-à-dire une structure très modulaire et une grande souplesse d'utilisation. En effet, la liste des divers types d'expériences dynamiques prévues actuellement n'est pas limitative et peut être amenée

à évoluer dans l'avenir. Il est donc nécessaire de pouvoir inclure, dans le programme général, ces nouvelles expériences sans pour cela avoir à refondre complètement celui-ci. C'est pourquoi le programme se présente sous la forme de l'organigramme de la figure 6-2. Le déroulement de l'exécution est dirigé par un programme moniteur. Celui-ci supervise six sous-programmes ou tâches. Il détermine, en fonction des directives données par l'opérateur, l'ordre de priorité attribué à chaque tâche et assure l'entrelacement des sous-programmes.

Ces sous-programmes sont, dans l'ordre hiérarchique :

1 - Traitement des interruptions.

Ce sous-programme n'est activé que lorsqu'une interruption externe survient, c'est-à-dire lorsqu'un incident de fonctionnement se produit. Ces interruptions sont générées par le tiroir de sécurité de l'ensemble CAMAC. Elles correspondent en général au déclenchement d'une alarme, par exemple : dépassement d'un seuil de température, arrêt d'une soufflante, chute de barres etc... A chaque type d'interruption est associé un traitement particulier. Celui-ci peut aller de l'arrêt simple de l'expérience incriminée, jusqu'à l'arrêt total de la commande avec retrait de toutes les boucles de leur position d'irradiation. Ce sous-programme possède évidemment le niveau de priorité le plus élevé.

2 - Commande des cyclages.

L'activation de ce sous-programme, lorsqu'une expérience dynamique est en cours, bloque l'accès aux sous-programmes 4, 5 et 6. A partir de la mesure de la température de sortie, il procède à une estimation des paramètres de la boucle commandée puis élabore le signal de commande optimale et l'adresse au tiroir CAMAC assurant le déplacement de cette boucle. A ce moment là, le superviseur peut, éventuellement, activer le sous-programme de régulation jusqu'à l'instant suivant d'échantillonnage. Le sous-programme de commande des cyclages reprend alors automatiquement le contrôle.

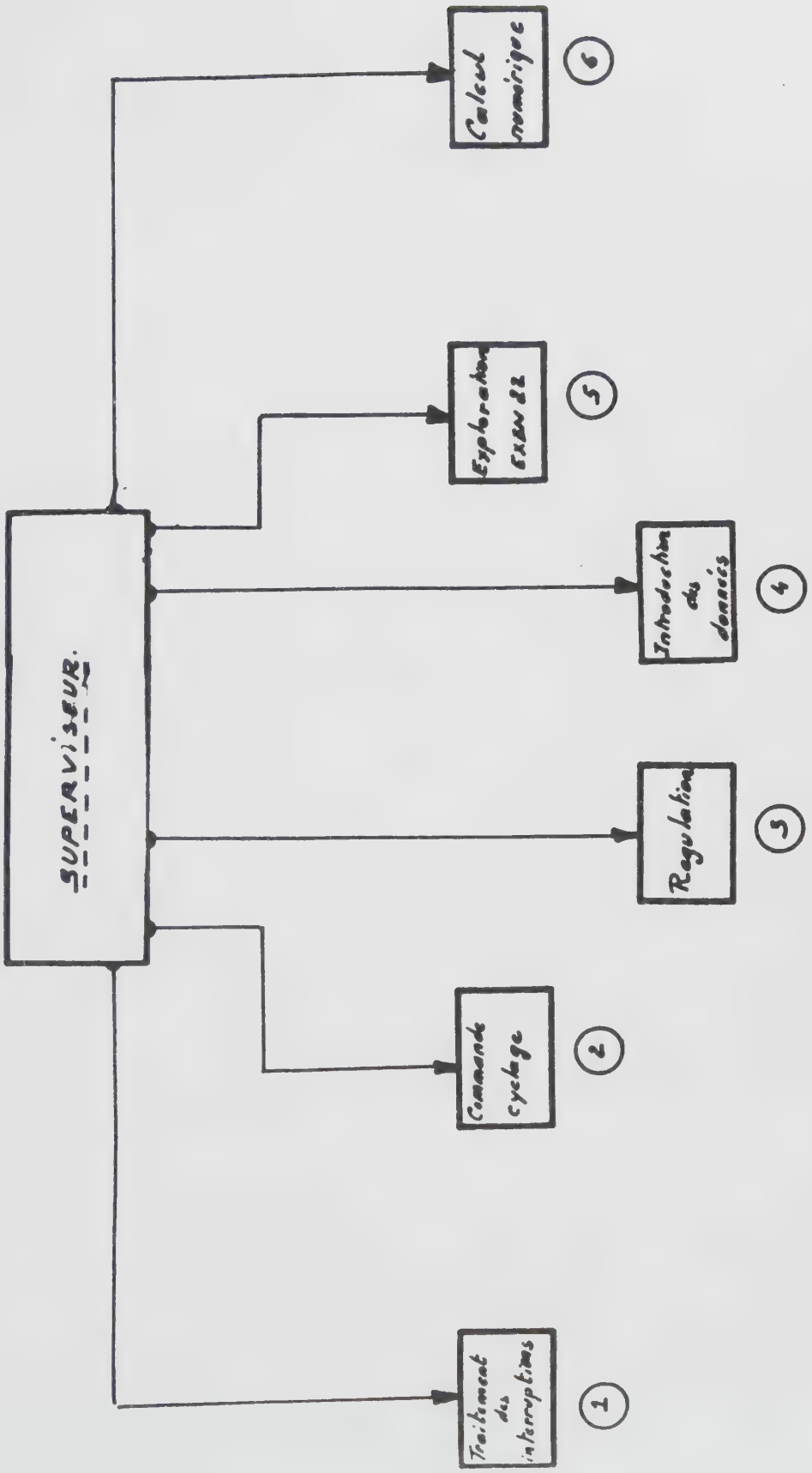


Fig. 6-2- PROGRAMME DE TRAITEMENT. ORGANIGRAMME

3 - Régulations.

Le fonctionnement de ce sous-programme est différent suivant qu'il y a ou non un cyclage en cours. Dans le premier cas nous venons de voir qu'il ne pouvait être activé que pendant les temps morts de celui-ci. Dans le second cas il a , au contraire, priorité sur les sous-programmes de niveaux inférieurs. A chaque boucle en régulation est affecté en mémoire un bloc de données contenant la température de consigne, les valeurs estimées des paramètres, les mesures de température etc... La même tâche est exécutée successivement avec chaque bloc de données. Un cycle de travail est constitué par les opérations suivantes : le calculateur adresse à l'EXEN 22 un ordre de mesure d'une température donnée. Lorsque le signal de fin de mesure apparaît, il procède à l'estimation des paramètres, puis au calcul des gains de contre-réaction et élabore enfin le signal de commande. Au bout d'une période d'échantillonnage le même travail est repris avec la boucle suivante.

4 - Introduction des données.

Ce sous-programme est activé, en l'absence de cyclage, par un signal externe déclenché par l'opérateur. Il sert à introduire en mémoire de nouvelles données ou à commander l'exécution d'une tâche particulière. Cette introduction se fait par lecture d'un ruban perforé ou à l'aide du clavier du Télétype. Si une donnée est manifestement incorrecte un message d'erreur est imprimé et l'opération est annulée.

5 - Exploration des voies de mesure.

Cette tâche consiste à lire sur le centralisateur EXEN 22 un ensemble de températures, concernant l'ensemble de la partie expérimentation, suivant une procédure donnée par l'opérateur. Les résultats de cette lecture sont imprimés sur le Télétype ou, éventuellement, sur le terminal 2770.

6 - Exécution d'un programme de calcul numérique.

Une zone mémoire reste libre pour l'introduction d'un programme de calcul numérique par l'utilisateur. Ce programme possède le niveau de priorité le plus bas.

L'ensemble du fonctionnement, en particulier pour les cyclages et les régulations, est rythmé par l'horloge temps réel du calculateur. Elle sert à déterminer les instants d'échantillonnage ainsi que l'évolution des expériences dynamiques en fonction du temps. Les différentes périodes d'échantillonnage doivent être déterminées de façon à ce que les tâches ne se recoupent pas.

7 - CONCLUSION

Le contrôle des systèmes expérimentaux, en physique nucléaire, pose un problème particulier. Il est, en effet, nécessaire de tenir compte des facteurs suivants :

- les expériences effectuées sont de natures diverses ;
- les systèmes à commander peuvent avoir des caractéristiques différentes suivant leurs conditions de fonctionnement ;
- l'installation doit répondre à de sévères impératifs de sécurité ;
- l'ensemble doit posséder un caractère très évolutif.

Ceci a pour conséquences d'imposer non seulement certains choix technologiques, mais aussi l'utilisation de méthodes de traitement élaborées. Ce dernier point a longtemps constitué un obstacle au développement d'une véritable automatisation dans ce domaine. Il n'existait, en effet, aucun moyen terme entre la commande classique à l'aide d'un ensemble de systèmes autonomes effectuant chacun une tâche particulière, et la conduite numérique globale de toute l'installation faisant appel à un ordinateur de forte puissance.

L'apparition sur le marché d'une nouvelle génération d'ordinateurs, relativement peu coûteux, bien adaptés au travail en temps réel, fournit maintenant une solution valable à ce problème. Parallèlement, la technologie électronique évolue vers une modularité toujours plus poussée, aussi bien par l'intégration des circuits, que par la définition de systèmes évolués, conçus pour travailler en ligne avec un calculateur (le standard CAMAC, par exemple). On aboutit ainsi à une commande centralisée, ne prenant en charge qu'une partie de l'installation mais possédant les moyens de calcul

nécessaires et la faculté de s'adapter rapidement à d'éventuelles transformations.

Sur le plan théorique, cette nouvelle orientation des systèmes de commande a les conséquences suivantes :

- le contrôle par calculateur autorise la mise en oeuvre de méthodes très élaborées, basées généralement sur l'utilisation de modèles mathématiques et qu'il est facile d'utiliser dans le programme de traitement ;

- la possibilité de calculer, en cours de fonctionnement, les valeurs de certaines grandeurs, amène à remettre en cause le choix des techniques d'étude des systèmes de commande. Il est intéressant, dans le cas présent, de pouvoir déterminer celle-ci à partir de paramètres représentatifs de l'état du système contrôlé. Ceci revient à donner la préférence, par rapport à des techniques plus classiques, à des méthodes de synthèse fournissant une vue d'ensemble d'ordre qualitatif, la plus globale possible, sur l'évolution des variables d'état ;

- la puissance, relativement restreinte, du type d'ordinateur utilisé conduit à essayer de définir de nouvelles procédures, résultant d'une simplification de la méthode employée, afin de réduire au maximum le volume de calcul nécessaire.

C'est dans cette optique qu'a été effectué le présent travail.

Nous avons essayé de mettre en évidence l'intérêt des méthodes modernes de synthèse des systèmes de commande dans la résolution de problèmes réels, et de montrer comment elles pouvaient être adaptées de façon à fournir une solution utilisable pratiquement.

La régulation en température des boucles d'irradiation du réacteur PEGASE, représentée par un système non linéaire du troisième ordre, a été étudiée à l'aide des méthodes topologiques, dans un espace de phase à trois dimensions. L'intérêt de ces méthodes est de fournir une vue d'ensemble complète de l'évolution du système, pour des conditions de fonctionnement

données. Leur nature, essentiellement graphique, se conjugue parfaitement avec l'évolution actuelle de l'informatique tendant à une utilisation "conversationnelle" de l'ordinateur au moyen de consoles de visualisation.

La théorie du contrôle optimal a constitué un outil puissant dans la définition de l'unité de commande de la partie expérimentation du réacteur. Elle nous a fourni le moyen, en particulier, de tenir compte des exigences relatives à la sécurité de l'installation. Nous avons montré que le fait de connaître à l'avance l'évolution du vecteur de consigne permet de définir un signal dit de "consigne anticipative" qui contribue à améliorer la fiabilité de l'ensemble en lui assurant un fonctionnement plus doux.

La diversité des types de boucles d'irradiation et des conditions de fonctionnement a entraîné l'adoption d'une structure auto-adaptative. Ceci nous a permis de définir un modèle mathématique simplifié, donc de réduire dans des proportions importantes le volume de calcul nécessaire à l'élaboration de la loi de commande optimale.

Quatre ensembles de régulation ont été réalisés et fonctionnent sur le site depuis 1968. La réalisation de l'unité de commande doit débuter au cours de l'année 1972.

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. ANDRONOV, A. VITT, S. KHAIKIN
Theory of oscillators (Pergamon Press) - 1966.

[2] R. BOUDAREL, J. DELMAS, P. GUICHET
Commande optimale des processus (Dunod) - 1967.

[3] J. BRASSEUR, M. DEAT, J. DE SARRAU
Etude analogique des régimes transitoires dans les boucles EDF. Rapport interne non diffusé.

[4] W. CUNNINGHAM
Analyse non linéaire (Dunod) - 1963.

[5] P. EYKHOFF
"Some fundamental aspects of process parameter estimation"
IEEE Transactions on Automatic Control, Octobre 1963.

[6] A. FELDBAUM
Optimal Control Systems (Academic Press) - 1965.

[7] C. GUINTRAND
Introduction à l'étude d'une commande optimale des boucles d'irradiation du réacteur Pégase. Rapport CEA R.3453.

[8] C. GUINTRAND
"Commande optimale dynamique des boucles d'irradiation du réacteur Pégase". Automatisme - Janvier 1971.

[9] S. GUPTA, L. HASDORFF
Fundamentals of automatic control (J. Wiley & sons)- 1970.

[10] R. KALMAN
"Contributions to the theory of optimal control"
Bol. Soc. Mat. Mexicana, Vol. 5 - 1960.

[11] I. LANDAU
"Analyse et synthèse des commandes adaptatives à l'aide d'un modèle par des méthodes d'hyperstabilité" Automatisme, juillet 1969.

[12] P. LEGOIN, J. LACOUR
Rapport de sûreté du réacteur Pégase. CEA R.2518.

[13] P. NASLIN
Théorie de la commande et conduite optimale (Dunod)- 1969.

[14] H. OTTAVI
Machines à apprentissage - Contrôle automatique des boude Pégase. Rapport DEG/EI/R.2289.

[15] P. PARKS
"Liapunov redesign of model reference adaptative control system". IEEE Trans. on A.C., juillet 1966.

[16] L. PONTRYAGIN and al.
The mathematical theory of optimal control (J. Wiley & sons), 1962.

[17] W. RUGH, G. MURPHY
"A new approach to the solution of linear optimal control problems". Jour. of Basic Eng., juin 1969.

[18] L. SIDERIADES
"Systèmes électroniques du 2° ordre". L'Onde Electrique, octobre 1958.

[19] L. SIDERIADES
"Méthodes Topologiques dans un espace à 3 dimensions". Revue Société Française des Mécaniciens, n°30, 1959.

[20] L. SIDERIADES, C. GUINTRAND
"Etude de la régulation des boucles d'irradiation du réacteur Pégase à l'aide des méthodes de phase". C.R. de l'Académie des Sciences, série A, t.266, n°15, 1968.

[21] L. SILVERMAN
"Transformation of time variable systems to canonical form" IEEE Trans. on A.C., n°2, 1966.

[22] L. SILVERMAN, MEADOWS
"Controllability and observability in time-variable linear systems". SIAM Jour. of Control, n°1, 1967.

[23] J. TOU
Optimum design of digital control systems (Academic Press) - 1963.

[24] P. VIDAL
Systèmes échantillonnés non linéaires (Dunod) - 1968.

- : -

UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE

FACULTÉ DES SCIENCES

PLACE VICTOR-HUGO (3e)

TÉL. 50-11-60

Marseille, le 29 MARS 1972

LE SECRÉTAIRE GÉNÉRAL

Référence à rappeler :
SCOLARITÉ 3ÈME CYCLE

À

MONSIEUR CLAUDE GUINTRAND

S/C DE MONSIEUR LE PROFESSEUR SIDERIADES

J'AI L'HONNEUR DE VOUS FAIRE SAVOIR QUE, PAR DÉCISION EN DATE DU 25. 3. 1972 MONSIEUR LE PRÉSIDENT VIENT D'ACCORDER LE PERMIS D'IMPRIMER POUR VOTRE THÈSE DE DOCTORAT D'ÉTAT ÈS SCIENCES PHYSIQUES PORTANT SUR LE SUJET SUIVANT :

" UTILISATION DES SYSTÈMES AUTO-ADAPTATIFS OPTIMALISANTS POUR LA COMMANDE DE DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX DANS UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE."

EN CONSÉQUENCE, IL CONVIENDRA DE FAIRE FIGURER LES MENTIONS CI-APRÈS À LA FIN DU TEXTE (ET AVANT LA BIBLIOGRAPHIE).

" VU ET PERMIS D'IMPRIMER
MARSEILLE, LE 25. 3. 1972
LE PRÉSIDENT,
F. BOREL. - "

L'Attachée d'Administration Universitaire
Chef du service de la Scolarité,

M. DELÉTANG - DESQUEUT

C. MOYNAULT. -

Edité
par le Bureau de Documentation
C.E.N. CADARACHE